

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
GRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES

TRABAJO FIN DE GRADO



**Detección y localización 3D de Descargas
Parciales en Escenarios de Propagación
Reales**

Trabajo Fin de Grado desarrollado por
Carlos de la Calle Fernández
bajo la tutela de la profesora
Matilde Pilar Sánchez Fernández

Madrid
Febrero 2016

Abstract

Sensing, measurement and location of partial discharges in the electromagnetic environment, are the tools to overcome against critical failure in electric and electronic systems, given these partial discharges are the distinguishing identifier of any sort of damage or wrong behaviour on the materials or equipments involving the generation, transport or transformation of the Electric Energy (mainly in high voltage situations).

On the same way, trying to avoid all the failures previously highlighted, contributes implicitly to an improvement of the usage of any system and its resources, given by the electromagnetic environment, since partial discharges are characterized by producing small radio-electric interferences .

The project developed in this portfolio tries to cover this situation, including the study and simulation by means of software, in a way that it is possible to isolate the background noise of the pulses occasioned by the Partial Discharges (PD), and also delimiting the time instants in which those pulses are received by a set of antennas so it is possible to sketch and approach the pulses location over the plan using iterative calculations.

Resumen

El sensado, medición y localización de descargas parciales en el medio electromagnético son herramientas con las que buscamos adelantarnos a fallos críticos en sistemas eléctricos y electrónicos, dado que estas descargas parciales son el identificativo inequívoco de un deterioro o mal funcionamiento de los materiales o equipos involucrados en la generación, transporte o transformación de la energía eléctrica (mayoritariamente a altas tensiones).

De igual modo, al intentar prevenir y subsanar dichos fallos se contribuye indirectamente a una optimización del uso y de los recursos que nos brinda el medio radioeléctrico (que, como ya sabemos, es un bien muy limitado) ya que las descargas parciales se caracterizan por producir pequeñas interferencias radioeléctricas, por lo que dicho rango podría verse contaminado con su presencia.

El proyecto que aquí se detalla tiene como objetivo abordar esta situación, con su estudio y simulación mediante software, de manera que se puedan diferenciar e identificar los impulsos debidos a las descargas parciales (DP) en el medio electromagnético y, de este modo, delimitar los instantes temporales en los que éstos son recibidos por cada una de un sistemas de antenas, pudiendo así mediante un proceso de cálculos iterativos (que será explicado con detenimiento) brindar su ubicación espacial aproximada en las tres dimensiones.

Índice general

1. Introduction	9
1.1. Historical introduction	9
1.2. Economical and social framework	11
1.3. Motivation	13
1.4. Purposes of the project and general scheme	17
2. Estado del arte	19
2.1. Las descargas parciales en el medio radioeléctrico	19
2.1.1. Definición técnica y características	19
2.1.2. Causas y consecuencias	23
2.1.3. Descargas parciales y su detección	24
2.2. Regulación	25
2.2.1. Regulación nacional e internacional	25
2.3. Tecnologías y tendencias en sensado de DP	26
2.3.1. Tecnologías tradicionales	26
3. Plataforma de desarrollo	29
3.1. Introducción al software Matlab	29
3.1.1. Entorno de desarrollo GUI de Matlab (GUIDE)	31
4. Planteamiento y Diseño de una Solución	32
4.1. Planteamiento y Planificación	32
4.2. Diseño de la solución	36
4.2.1. Detección de Descargas Parciales	36
4.2.2. Localización de Descargas Parciales	38
5. Desarrollo	39
5.1. Desarrollo en la detección de descargas parciales	39
5.1.1. Fuente de los datos de DP empleados	39
5.1.2. Identificación de una DP respecto al medio	41
5.2. Desarrollo de la localización iterativa	47

5.2.1. Diagrama de flujo del proceso iterativo	57
5.3. Presentación de los datos	58
5.3.1. Interfaz visual del programa	58
5.4. Alternativas de diseño	62
6. Resultados	64
6.1. Resultados del proceso	64
6.2. Errores debidos a cambios en los parámetros del sistema . . .	69
7. Conclusiones y líneas futuras	70
7.1. Conclusions	70
7.2. Líneas futuras	71
8. Coste y gestión del proyecto	72
8.1. Presupuestos y costes	72
8.1.1. Presupuesto y material empleado	73
8.1.2. Hoja de costes	75
8.2. Plan de gestión del proyecto	76
8.2.1. Diagrama de Gantt	79
A. Extended abstract	80

Índice de figuras

1.1. Ways of releasing energy from a partial discharge.	15
1.2. Pulse signal.	17
1.3. Triangular pulse signal.	17
1.4. Sinc signal.	18
2.1. Descarga parcial en corona.	20
2.2. Descarga parcial superficial.	21
2.3. Descarga parcial interna.	21
3.1. Espacio de trabajo de MATLAB R2014a.	29
3.2. Ventana de configuración (GUIDE) de la interfaz.	31
4.1. Plano original de la subestación de Fuencarral y sus posteriores ampliaciones y modificaciones.	33
4.2. Esquema de toda la subestación de Fuencarral con el Parque blindado (GIS) de 220kV detallado [17].	34
4.3. Sección de un Edificio GIS.	35
5.1. DP con ventana señalizando su lapso principal	41
5.2. Separación en ventanas para análisis de la DP	42
5.3. Resultados de correlación con señal pulso para cada tipo de DP (negra Corona, roja Superficial, Verde Interna) y la media de dichos resultados de correlación.	43
5.4. Resultados de correlación con señal sinc para cada tipo de DP (negra Corona, roja Superficial, Verde Interna) y la media de dichos resultados de correlación.	44
5.5. Resultados de correlación con señal pulso triangular para cada tipo de DP (negra Corona, roja Superficial, Verde Interna) y la media de dichos resultados de correlación.	44
5.6. Comparación de señal de DP en corona aleatoria y su maestra.	45
5.7. Comparación de señal de DP superficial aleatoria y su maestra.	45
5.8. Comparación de señal de DP interna aleatoria y su maestra.	46

5.9. Escenario con las regiones de decisión en el plano XY.	47
5.10. Representación de la descarga generada en el escenario 3D. . . .	49
5.11. Representación de DP (rojo), junto a los tiempos de llegada a las antenas y sus diferencias (datos en negro) de distancia desde que llega a la primera antena (datos en rojo).	51
5.12. Representación de los puntos estimados que son creados para cada región de decisión.	52
5.13. Variaciones de la posición original en el espacio.	55
5.14. Diagrama de flujo que resume el comportamiento del localizador de DP.	57
5.15. Pantalla principal de la interfaz.	58
5.16. Pantalla principal con el proceso ejecutado.	59
5.17. Pestaña de evolución de error cuadrático y de distancia con las iteraciones.	60
5.18. Pestaña respuestas impulso representando las posiciones de la DP en cada una de las antenas.	61
5.19. Ventana con los recursos empleados para ejecutar el programa. .	61
5.20. Disposición a la misma altura del conjunto de antenas en el escenario.	62
5.21. Disposición a diferente altura del conjunto de antenas en el escenario.	63
6.1. Lectura en el tiempo de las señales recibidas por las diferentes antenas.	65
6.2. Decisión sobre la llegada de la DP a cada una de las antenas. .	65
6.3. Ubicación de la DP para cada antena según el detector.	66
6.4. Representación del escenario en la prueba del programa	67
6.5. Comparativa para cada iteración del error cuadrático y de distancia.	68
7.1. Prototipo de la interfaz de la aplicación móvil.	71
8.1. Diagrama de Gantt.	79

Índice de tablas

1.1. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Gold Book Table.	13
5.1. Distribución en array de dos dimensiones para los valores capturados de las DP.	40
6.1. Tabla de comparativa para diferentes alturas de antenas. . . .	69
8.1. Descripción del equipo informático empleado	73
8.2. Descripción de los servicios contratados a la ISP.	73
8.3. Costes totales del proyecto, con y sin tasas.	75

Listado de Acrónimos

- DP: Descarga parcial.
- ERA: Electrical Research Association.
- NFPA: National Fire Protection Association.
- NEC: National Electric Code.
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- UHF: Ultra High Frequency.
- UNE: Una Norma Española.
- VLF: Very Low Frequency.
- GIS: Gas-insulated switchgear.
- AIS: Air-insulated switchgear.
- TCP/IP: Transmission Control Protocol / Internet Protocol.
- ISP: Internet service provider.
- FO: Fibra óptica.

Capítulo 1

Introduction

1.1. Historical introduction

The first observations of partial discharges throughout history were evident in the research of electrostatic energy around XVII century [1], when scientists were first aware of the fact that charged conductors were sensible to vary their charge, and the rate of this variation was increasingly changeable bounded to environment conditions.

By late XVIII century, scientists had already found out that the loss of charge was not determined by means of the solid insulation, but due to atmospheric conditions, which indeed gave a more logical and accurate explanation to the phenomenon known as *electrical sparks*.

The concept of *acknowledgement (or sensing) of partial discharge* was conceived in 1777 by the researcher Georg Christoph Lichtenberg. Meanwhile, in Italy, Alessandro Volta observed a similar phenomenon caused by the static electricity generated by one of its inventions, the *Electrophor*, causing that several specified particles, such as dust particles, tended to group forming shapes resembling stars or circles. Nevertheless, more than 100 years were necessary to advance in scientific research to prove that those phenomena were the clear evidence of the existence of partial discharges, and the dust figures represented dielectric surface discharges appearing as electrical discharge channels.

In 1873 Maxwell published *A Treatise on Electricity and Magnetism*, which was of vital importance for the design of instruments for the detection of Partial Discharges (PDs), and also for the development of physical models that would allow a better comprehension of this complex phenomenon. Some years later, Hertz was able to prove the existence of electromagnetic waves, previously postulated by Maxwell, and their propagation over time

and space.

As this document will expose, these two events (Maxwell research and Hertz discovery), are more related than it seems, and they highly contribute to the study of partial discharges outlined in this report.

The progressive study and understanding of partial discharges became important in the first part of XX century, as a consequence of the practical application of electric energy, and the appearance of new equipments of high voltage to supply, transmit and distribute electricity.

The first device designed for measuring the detection of partial discharges was the loss factor bridge, developed in 1919 and implemented by the first time in 1924 [2]. One year later, the father of this device, Schwaiger, acknowledged the radio-frequential properties located inside the corona discharges, establishing the basis to deploy the radio-frequency interference counters, designed to determinate the impact of the noise present in the corona discharges, still highly used nowadays.

Once more, several researches were followed throughout the years until the decade of 1960, when the first detectors of partial discharges were commercialised, a market niche opened by the Electrical Research Association (ERA), when they introduced into the market the original detector of partial discharges. Since then, and specially in the last 30 years, the equipment designed for the detection and location of partial discharges has evolved to come out with a large range of sensors and analysis techniques with a variety of purposes, developed for a wide amount of companies, that is still growing.

1.2. Economical and social framework

Partial discharges and their studies have played an important role in electrical scientific research specially from the second part of the XX century, being promoted and focusing many other research branches until nowadays. Inside this framework, it is important to understand the phenomena produced around partial discharges, highlighting the reasons after them, the different factors conditioning their behaviour, and the preventive measures to smooth their consequences. At the same time, it is also important to count on the capacity of testing them to obtain measurements and results that can even prevent possible critical damages in equipment and insulating materials used in electrical systems.

As a consequence of this, there is a wide number of scientific norms that currently establish patterns and guidelines regarding to the treatment of partial discharges. On top of that, it also grows the number of scientific plants and laboratories investigating the stochastic properties of partial discharges and monitoring their physical activity on the environment, in order to contrast their data with historical data already registered, all with the goal of developing systems that prevent failures, trying to provide also the better quality.

It is not a discussion why companies would invest in equipment for detecting partial discharges, since all the electric systems are vulnerable to suffer from those failures, and this would suppose an economical risk even higher than the expense of investing in equipment that tries to prevent those possible failures. Furthermore, it is not only about the damage of a costly engine inside a plant, many other extreme consequences can follow after when talking about damage of electrical pieces, such as uncontrolled fires that can damage other engines, risk of electrocution for the human resources, or the explosion of the whole equipment. Of course, all these extreme consequences would carry important economic losses.

One of the most important services offered by the electric industry in the socioeconomic status of the population, is providing a constant electrical flow with a high quality. In order to assure the quality of the electric energy provided, it is important to grant an accurate behaviour in all the main components of the electric flow: from transforms, wires, generators and switches. Isolating those components and preserving them against surge issues is quite important for guaranteeing an appropriate quality on their lifetime. Partial discharges are dielectric breakages located in a small part of the electric isolation, caused by tiny holes, cracks or inclusions inside a solid dielectric, interconnections between liquids and solids, or bubbles appearing in liquids, through the contact line between different materials of the isolation area.

Therefore, to assure a good maintainance on the isolation of the high voltage equipments, it is important to keep a constant analysis of the partial discharges during the fabrication, inception, commissioning, and also during the lifetime of the equipment too, to prevent from damages and fulfill the security conditions and quality rules towards them.

1.3. Motivation

Encouraged by the chance of developing an alternative design towards the detection and estimation of partial discharges, there are several milestones to highlight as goals of the project, that will be found during the execution of this research. In order to summarise the main aspects that will be exposed:

- **Integrity on the equipment and components, as well as physical integrity and security in the working environment**

One of the goals of this project is security. Like it was previously introduced, partial discharges may cause damages that can lead to uncontrolled fires or some other worse scenarios, which are real risks for the work safety, and also for the structural integrity of buildings. According to National Fire Protection Association (NFPA), the major cause of electrical failure is the breakage of an insulator, agreeing with the National Electric Code (NEC), that points out partial discharges as the main reason of the degeneration of insulating materials [3].

Component	% of Insulation Failure
Transformers	84 %
Circuit Breakers	21 %
Disconnect Switches	15 %
Insulated Switchgear Bus	95 %
Bus duct	90 %
Cable	89 %
Cable Joints (splices)	91 %
Cable Terminations	87 %

Cuadro 1.1: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Gold Book Table.

Table 1.1 offers the average rate of failure per component, comparing all the components intervening in the electric supply flow: wires, insulated electric frames, and transformers are the components where the losses suffered are the the greater. These events are remarkable given the importance of the prevention of occupational risks, despite electricity is barely a 2 % of the causes of accidents at work, the severity of those accidents enforces the problem, since mortal accidents at work due to electrocution is around the 4 % to the 8 % [3], which makes a high rate of mortality beside the former 2 % [4].

■ Compliance with legislation in the radio-electric government

This goal comes encouraged by the consequent pollution derived from the existence of partial discharges at the environment. Mainly, there are three phenomena [5] severely contributing to this issue:

- Electromagnetic emissions

Radiowave emissions generating light and heat can contribute to the pollution of the radioelectric spectrum in the UHF (Ultra High Frequency) band, and also can cause small interferes in some other signals and communication processes. However, this inconvenience can become a double-edged sword when using these hypothetical external signals (such as WiFi or TV signals) as sources interfering to the estimation of partial discharges.

- Accoustic emissions (in the ultrasonic and perceptible ranges)

These emissions are produced in the ultrasonic range and the audible range, the range of frequencies perceived by the human ear. Those acoustic manifestations are the sound related to the electrical sparks caused by an electrical failure. Regarding to the range not perceived by the human ear, these emissions can be reused in techniques and processes related to the detection of partial discharges, equivalent to the one described in this project [6].

- Chemical reactions

When a partial discharge happens, there is a chemical reaction following, where gases such as Ozone [7] or Nitrous Oxide (seldom situations) can be liberated. The bigger the partial discharge is, the greater the amount of Ozone will be released, thus it is important to control the level of gas accumulated specially in closed environments where a set of legislation rules is present.

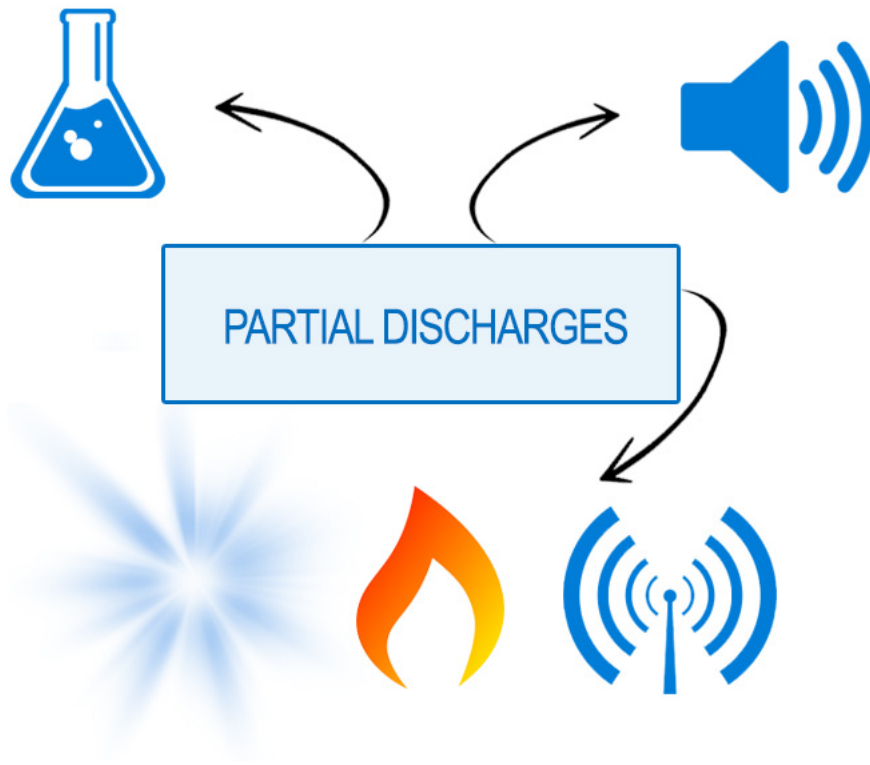


Figura 1.1: Ways of releasing energy from a partial discharge.

Based on the previous reasons, it is highly important to maintain an exhaustive follow-up to the potential existence of partial discharges. And, in the case when they appear, try to overcome as much as possible on behalf of respecting the current legislation regarding to pollution, always keeping the purpose of designing effective and quick methods to detect and locate partial discharges. This is, indeed, the main goal of this project.

- **Cost reduction due to an optimized system with a low cost implementation**

As important as developing an accurate system for detection and location of partial discharges, is looking for an effective and competitive tool against the current technologies of the market, capable of providing results regarding to the estimation of partial discharges in a short time, reducing the costs caused by the rest of the systems. In fact, a plain engine based on a set of four antennas can compete with costly equipment, offering a simple installation and implementation of a good solution for locating partial discharges. Furt-

hermore, something as light as a set of antennas can be easily portable and replaceable, according to the needs of the whole system.

1.4. Purposes of the project and general scheme

Given the scope of the research, this project has the purpose of fulfilling the following technical skills:

1. Provide an introduction and study of the nature of partial discharges, trying to establish a basic knowledge of the theoretical concepts, in order to design logic and robust algorithms to accomplish the detection of partial discharges.
2. Develop an usability study of the signal obtained with a partial discharge compared to another signal more typical and frequent in calculations [8] such as a triangular pulse, a rectangular pulse or a sinc wave. A successful output of the study would be a simplified approximation of a correlation capable of detecting the appearance of a partial discharge.

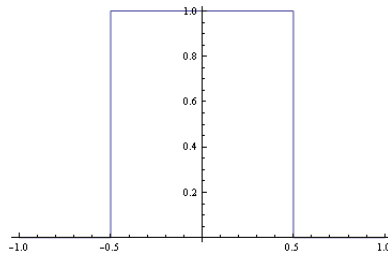


Figura 1.2: Pulse signal.

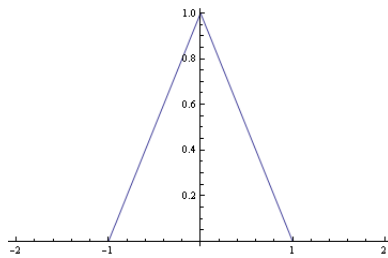


Figura 1.3: Triangular pulse signal.

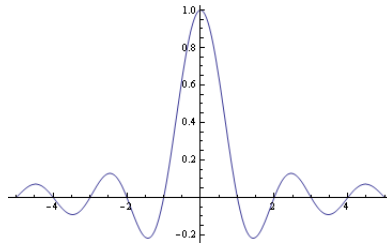


Figura 1.4: Sinc signal.

3. From the previous usability study, develop a software program using the mathematical tool Matlab, modelling a system capable of detecting partial discharges in the radio-electric medium, based on correlation methods to determine the time instants when the signal is arriving to each of the elements of an antenna set (antenna set used as a reference).
4. For the previous Matlab software program, develop a system to locate partial discharges in space, using as help the previous method, developed for detection, that will convert the beginning of the signals generated in each partial discharge, in pulse responses. This will provide a simplification of the signals, and it will also help to locate them in space, determining which is the closest antenna to the signal, given the set of antennas.
5. Design of a graphical interface, helpful for modifying parameters related to the simulation of the problem. Thus, it will be possible to perform tests suitable to validate the quality of the development implemented to overcome partial discharges in this project. Furthermore, results will be presented in a compact and visual form.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Las descargas parciales en el medio radioeléctrico

2.1.1. Definición técnica y características

Definición y tipos

A lo largo de este documento se irá completando en diversos puntos el concepto que define a las descargas parciales y lo que ellas suponen con diferente información, pero por ahora comenzaremos con una definición base sobre la que iremos trabajando.

En ingeniería eléctrica, el término descarga parcial (DP) hace referencia a una ruptura dieléctrica, y su consiguiente liberación de energía, localizada en una pequeña región de un sistema sólido o líquido de aislamiento eléctrico, generalmente debido a imperfecciones en el proceso de fabricación o el intenso uso mantenido, el cual es sometido a condiciones de estrés de alta tensión que no puentea el espacio entre dos conductores[9].

Una descarga parcial puede dañar el material del aislamiento por la erosión del mismo. También se pueden producir otros daños debido a gases corrosivos emitidos por una fuente de DP en el aislamiento y en las piezas metálicas circundantes. A la larga, el medio aislante puede fallar produciendo un fuego, que a su vez puede provocar daños en los aparatos eléctricos, interrupciones del suministro eléctrico y explosiones.

Las descargas parciales pueden ser:

1. Descarga en corona

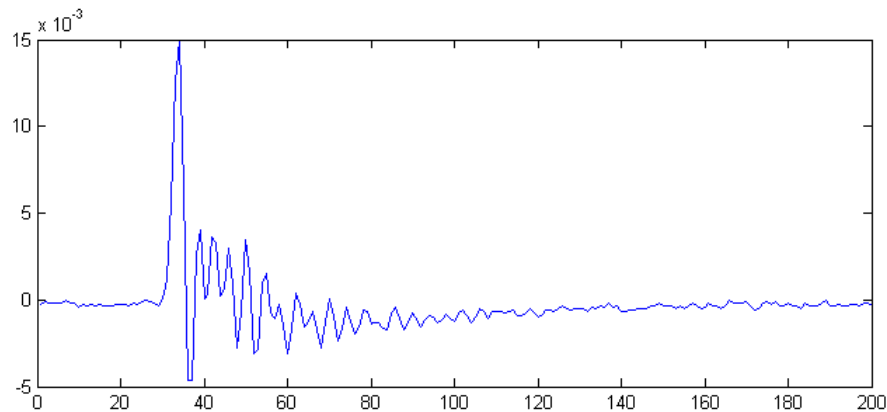


Figura 2.1: Descarga parcial en corona.

Las descargas en corona (Figura 2.1) se producen típicamente en partes afiladas o sobresalientes de un conductor, generalmente de equipos de exterior, cuando el campo eléctrico del conductor sobrepasa la tensión de ruptura del aire (o gas) que rodea dicho conductor.

En principio la presencia de este tipo de descargas parciales no supone un problema serio, ya que suelen producirse en entornos exteriores en los que los gases que favorecen este fenómeno se dispersan con facilidad, no obstante se recomienda eliminar el problema que las provoca en la medida de lo posible para evitar que compliquen la detección de otro tipo de descargas más críticas para los equipos.

2. Descarga superficial

Generalmente localizadas en la superficie de un aislante, las descargas superficiales (Figura 2.2) son una forma de DP bastante común. Pueden estar provocadas por la humedad ambiente en la que se encuentra el equipo o por la contaminación y su respectiva presencia de suciedad que altera las características de la superficie.

Como consecuencia de estas descargas pueden aparecer pistas de conducción en la superficie del aislador o incluso grietas si hablamos de aisladores de porcelana, que además de reducir su eficacia acarrean

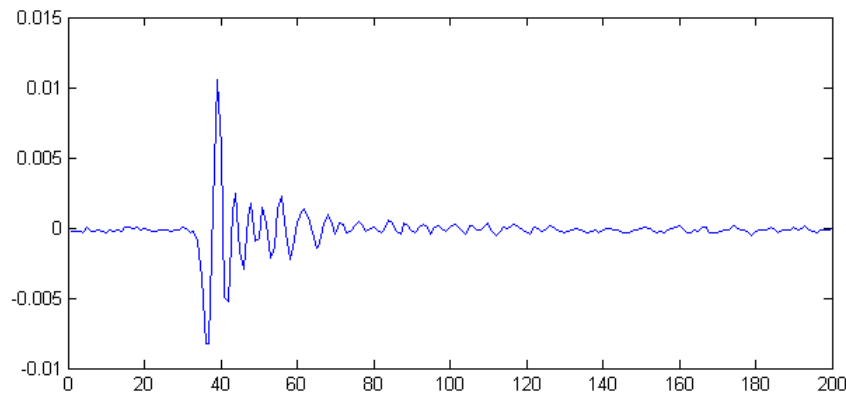


Figura 2.2: Descarga parcial superficial.

un alto riesgo de incendio, ya que la no reparación de los puntos de descarga hace que estos aumenten en tamaño y puedan llegar a arder.

3. Descarga interna

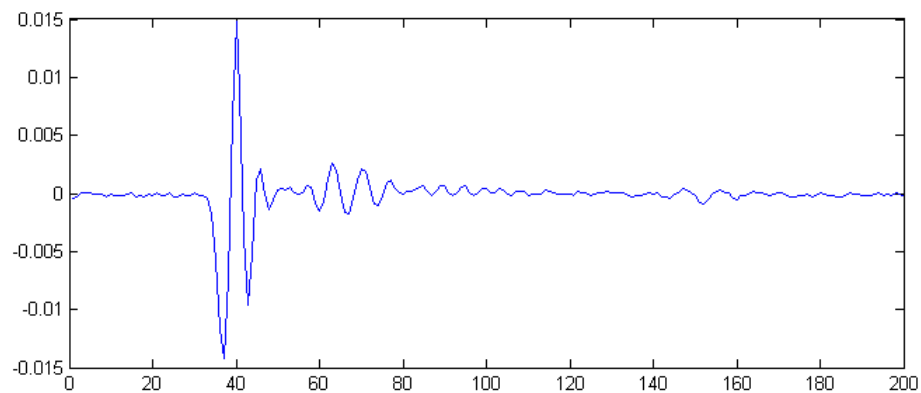


Figura 2.3: Descarga parcial interna.

La descarga interna (Figura 2.3) se caracteriza por producirse en el interior de un material aislante (ya sea sólido o líquido) y se debe, por lo general, a pequeñas imperfecciones en forma de cavidades huecas, a menudo debidas en origen a un pobre (y puntual) proceso fabricación industrial y acentuadas por la acción de la alta tensión.

Al no presentar síntomas perceptibles por los sentidos humanos se convierten en un tipo de descarga poco común y de difícil diagnóstico en

campo, lo que sumado a su alta probabilidad de ocasionar fuegos o explosiones (debido a la rápida liberación calorífica en el interior del aislante) hace necesario buscar vías eficaces que faciliten su detección a tiempo.

2.1.2. Causas y consecuencias

Las DP pueden ocurrir en cualquier momento a causa de los procesos de manufacturación o instalado, por el deterioro térmico o suciedad en los componentes entre otros motivos, siempre que el campo eléctrico exceda la tolerancia de la porción de dicho material aislante [10].

En función del grado de deterioro del material aislante se puede observar el número creciente de DP que se suceden, ya que están directamente relacionados. Por otro lado, aunque la magnitud de las DP no se puede relacionar directamente con el tiempo de vida útil restante del material, si las DP se duplican aproximadamente cada medio año podemos concluir que el deterioro se produce a gran velocidad [11].

Entre las causas por las que se suceden las descargas parciales se incluyen:

- Vacíos en el interior de un aislante sólido.
- La contaminación por partículas en la superficie del material aislante.
- Las irregularidades (por ejemplo, picos o aristas) en la superficie de material aislante
- Burbujas de aire/gas en un aislante líquido
- Partículas flotantes en aislantes gaseosos
- Descargas alrededor de un electrodo en gas (actividad en corona)
- Fallo mecánico o daño en los materiales aislantes.

Las causas también se ven afectadas por factores ambientales, incluyendo la temperatura, la presión atmosférica y la humedad.

Aunque ya hemos abordado el tema en secciones anteriores, es importante recordar debido a la índole del apartado que las descargas parciales emiten su energía de diferentes maneras, a saber: mediante emisiones electromagnéticas, y en forma de luz y calor, o bien mediante emisiones acústicas o incluso con la emisión de gases de ozono y óxido nitroso.

En lo referente a problemas de seguridad y salud, cuando los sistemas no están ajustados o son inefectivos, el fallo de los equipos de medio y alto voltaje es a menudo repentino y de consecuencias catastróficas, lo que puede llegar a producir grandes daños materiales, lesiones o muerte, ya que estos fallos repentinos liberan grandes cantidades de energía, acarreando explosiones y fuegos. Las DP no detectadas pueden ser, por tanto, muy peligrosas para el personal, quienes están expuestos a peligro de electrocución por uno de estos equipos defectuosos.

2.1.3. Descargas parciales y su detección

Hay diversos tipos de medidas en campo que permiten la escucha del medio para la detección de las descargas parciales, estas deben ser rápidas, seguras y sencillas, y entre otras podemos enumerar las relacionadas con tensiones transitorias a tierra, las medidas de ultrasonidos o la detección de campo electromagnético.

Centrándonos en la detección por campo magnético (la que atañe a este documento), esta nos permite captar las ondas de radio generadas por la descarga parcial. Puede lograrse una medida con mayor sensibilidad, especialmente a mayores tensiones, utilizando antenas UHF integradas o antenas externas montadas en separadores aislantes instalados en la estructura metálica circundante.

2.2. Regulación

2.2.1. Regulación nacional e internacional

Normas relativas a las descargas parciales:

- IEEE Std 400-2001. Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems
- IEC 61934:2006. Electrical insulating materials and systems - Electrical measurement of PD under short rise time and repetitive voltage impulses.
- IEEE Std 436TM-1991 (R2007). IEEE Guide for Making Corona (Partial Discharge) Measurements on Electronics Transformers.
- UNE-EN 60270:2002. Técnicas de ensayo en alta tensión. Medidas de las descargas parciales.

Relativas al espectro:

- UNE 21000-1-2:2002 IN. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 1-2: Generalidades. Metodología para la consecución de la seguridad funcional de equipos eléctricos y electrónicos desde el punto de vista de los fenómenos electromagnéticos.
- IEEE Std C95.1-2005. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz

Relativas a la seguridad eléctrica:

- UNE 207020:2012 IN. Procedimiento para garantizar la protección de la salud y la seguridad de las personas en instalaciones eléctricas de ensayo y de medida de alta tensión.

2.3. Tecnologías y tendencias en sensado de DP

2.3.1. Tecnologías tradicionales

Existen en general dos grandes grupos diferenciados de tecnologías empleadas en el sensado de DP's [12], siendo tales grupos las técnicas Off-Line y las técnicas en servicio:

Técnicas de sensado off-line

Requieren el corte de energía mientras el test está siendo ejecutado y, en determinados casos, el componente ha de ser completamente extraído del sistema de distribución. Cuenta con la ventaja de tener un gran control del voltaje empleado durante la prueba, de manera que éste puede ser incrementado por encima del voltaje de operación usual si el caso lo requiriera. El aislar el componente del sistema y usar un voltaje concreto ayuda a minimizar el ruido en la lectura, por lo que también se elimina la necesidad de realizar filtrados y complejas interpretaciones de los datos, como ocurriría en el caso contrario.

- *Testeo de Alta Potencia:*

Las pruebas de mantenimiento de alta potencia en corriente continua en componentes envejecidos pueden dañarlos, ocasionando fallos prematuros. Por lo tanto se considera una técnica bastante invasiva hacia el material, que implican riesgos importantes de producir daños, lo que es algo a tener en consideración.

Sin embargo, este tipo de pruebas continúan siendo muy útiles para comprobar nuevos sistemas antes de comenzar su puesta en servicio.

En este punto la responsabilidad está en el lado de los fabricantes, que deben tener en consideración el informar de los niveles de voltaje aceptable y de las recomendaciones típicas que pudieran ser pertinentes a la hora de hacer este tipo de testeo.

- *Testeo de Factor de Disipación:*

El Factor de disipación es uno de los sistemas de diagnóstico off-line más poderosos que se emplean para controlar las condiciones del aislamiento de un conductor. Los valores de capacitancia de un aislamiento nuevo son usados como lecturas de referencia, de esta manera si comparamos periódicamente dichos valores obtenidos con otros de otro aislamiento diferente podremos estimar su deterioro, predecir la esperanza de vida útil y anticiparse a errores del sistema planificando mantenimientos y reparaciones a priori.

Técnica muy efectiva en la tarea de localizar debilidades y potenciales peligros en el aislamiento antes de que lleguen al fallo.

En este caso, la técnica no requiere estresar o sobrecargar el aislamiento, y es posible determinar si está degradándose de manera lenta (lo que a priori complica su temprana detección).

Uno de los inconvenientes es que esta técnica está bastante limitada, por ejemplo para su empleo en cables debe ceñirse longitudes cortas, de otra manera estos factores podrían ser de difícil estudio y por lo tanto no resultar muy efectiva.

- *Testeo de muy baja Frecuencia (VLF):*

- *Testeo VLF de alta potencia:*

En este tipo de sensado, a pesar de sus características agresivas hacia el material, la capacidad de aplicarlo a muy baja frecuencia hace posible que se dañe en menor medida, y nos permite realizar una localización aproximada de puntos de fallo potenciales. Además, la baja frecuencia exige muchos menos requisitos de energía, lo que hace que los kits de equipamiento usados sean más compactos y versátiles (ofreciendo mucha más comodidad).

- *Testeo VLF forzando las DP:*

En este caso el voltaje es incrementado hasta forzar que ocurra una descarga parcial artificialmente, a continuación es posible localizarla usando métodos de detección temporal.

Este procedimiento ofrece una ventaja significativa sobre otras tecnologías de sensado por su capacidad para medir la respuesta a un nivel de estrés específico y poder predecir su rendimiento futuro en circunstancias no dadas hasta el momento, todo ello sin resultar agresivo o dañino hacia el material.

Técnicas de sensado en servicio

La principal ventaja de estas técnicas es que el propio testeo no suponga un riesgo añadido para el equipamiento analizado; el componente no es extraído del sistema en ningún momento, permitiendo que esté en servicio como si de un escenario de funcionamiento habitual se tratase. Se denota, por tanto, que su principal baza es eliminar la posibilidad de daños debido a la conmutación (conexión-desconexión) inapropiada, al mismo tiempo que no limita la capacidad general del sistema al no remover ninguna de sus partes.

- *Testeo por ultrasonidos:*

Con esta técnica es posible detectar un problema no identificado si el equipo en cuestión es físicamente accesible y no está escondido o soterrado.

Los ultrasonidos de alta frecuencia propios de las DP tienen, por naturaleza, componentes de muy baja longitud de onda, que son fácilmente aislables del posible ruido de fondo presente en la medición.

- *Testeo Online para sistemas cableado:*

Este método es 100 % no destructivo y 100 % no invasivo, ya que no requiere de fuentes externas de voltaje o corriente, es una prueba en la que no se interrumpe el sistema ni se le somete a niveles excesivos de tensión como ocurría algún método anteriormente descrito; alternativamente mide las DP producidas con un voltaje propio del sistema de 2400 Voltios o superior. Al ser el sistema independiente de la corriente de carga, facilita las mediciones y agiliza el proceso.

Capítulo 3

Plataforma de desarrollo

3.1. Introducción al software Matlab

Según la definición ofrecida en su portal oficial [13], Matlab es *el lenguaje de alto nivel y el entorno interactivo utilizado por millones de ingenieros y científicos en todo el mundo. Le permite explorar y visualizar ideas, así como colaborar interdisciplinariamente en procesamiento de señales e imagen, comunicaciones, sistemas de control y finanzas computacionales.*

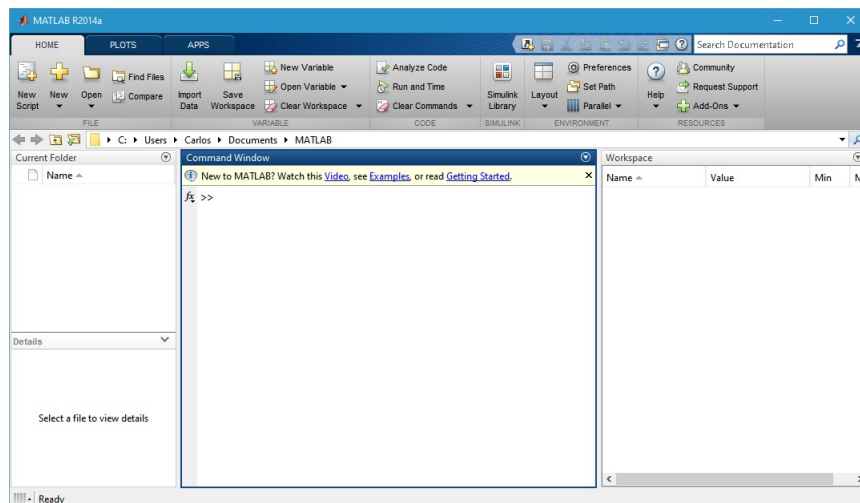


Figura 3.1: Espacio de trabajo de MATLAB R2014a.

Además, entre sus principales características destacan entre otras:

- *Lenguaje de alto nivel para el **cálculo numérico**, la **visualización** y el **desarrollo de aplicaciones**.*
- *Entorno interactivo para la iterativa exploración, el diseño y la **solución de problemas**.*
- *Gráficos integrados para **visualizar datos** y herramientas para crear gráficos personalizados.*
- *Herramientas para crear aplicaciones con **interfaces gráficas personalizadas**.*

Por todas estas características y otras como por ejemplo su versatilidad, las posibilidades que ofrece o la experiencia adquirida en este lenguaje durante la etapa universitaria se decidió el empleo de este software para el desempeño del proyecto, cuyas fases de desarrollo veremos posteriormente.

3.1.1. Entorno de desarrollo GUI de Matlab (GUIDE)

Por motivos de diseño se ha decidido implementar una interfaz gráfica para el código desarrollado de manera que sea más sencillo y ágil para el usuario interactuar con las diferentes opciones, resultados y órdenes del programa, facilitando también una rápida visualización de las gráficas pertinentes.

Para ello haremos uso de GUIDE [14], el entorno de desarrollo gráfico integrado en Matlab. Esta herramienta nos permite crear de una manera muy visual e intuitiva nuestra interfaz gráfica y también nos ayudará creando de manera automática el código que estructura las ventanas (al que posteriormente tendremos que dar la lógica deseada haciendo uno de handles y definiendo el comportamiento de elementos tales como botones, listas, etc.).

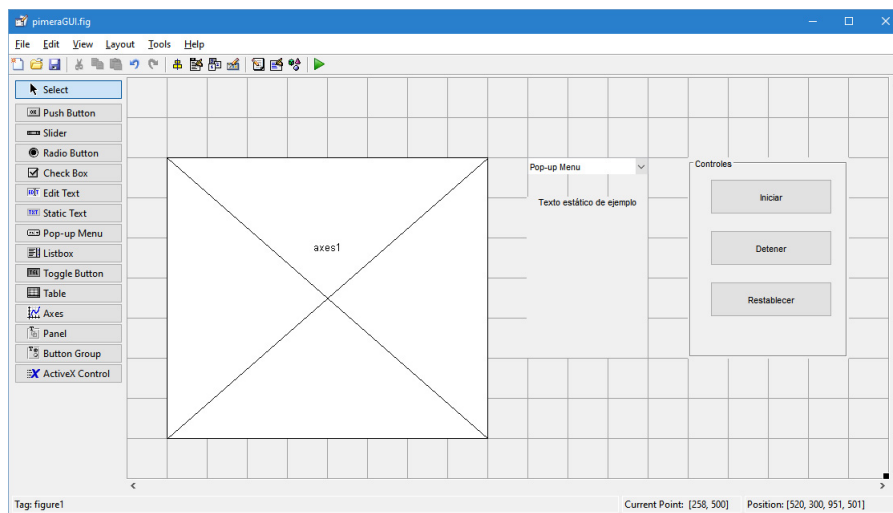


Figura 3.2: Ventana de configuración (GUIDE) de la interfaz.

Capítulo 4

Planteamiento y Diseño de una Solución

4.1. Planteamiento y Planificación

Para este proyecto tomaremos como escenario de referencia en el que plantear el problema principal una subestación de transformación GIS (Gas Insulated Switchgear). Los motivos de esta decisión son los de asemejar las condiciones del escenario lo máximo posible a las presentes en la toma de medidas de DP empleadas en el desarrollo, que fueron en un laboratorio (recinto real cerrado y controlado). A continuación se expondrá una breve descripción de estación GIS convencional y las ventajas que supone.

Es importante recordar que el escenario real que está a punto de ser descrito sirve llanamente de inspiración para nuestro propósito (recinto cerrado en el que potencialmente pueden generarse DPs), sin ahondar más en otros aspectos. Las medidas que propuestas así como otras características son aproximadas, tomadas a criterio personal y tan válidas como otras posibles y no tienen por qué guardar relación con las reales.

Por tanto, nuestro hipotético escenario para el caso de estudio está basado e inspirado en unas instalaciones eléctricas propiedad de Iberdrola S.A., ubicadas en el distrito de Fuencarral-El Pardo y limítrofes con el Término municipal de Alcobendas.

En la Figura 4.1 se observa el primer plano emitido, con la parcela concedida para las instalaciones originales (límite azul más amplio), la posterior ampliación con un parque de 400kV y una configuración convencional de intemperie (límite verde en el sector noroeste) y, finalmente, el espacio ocupado por la subestación GIS en edificio blindado (límite rojo, ubicado en la parte suroeste de la parcela original y correspondiente a un parque de 220kV).

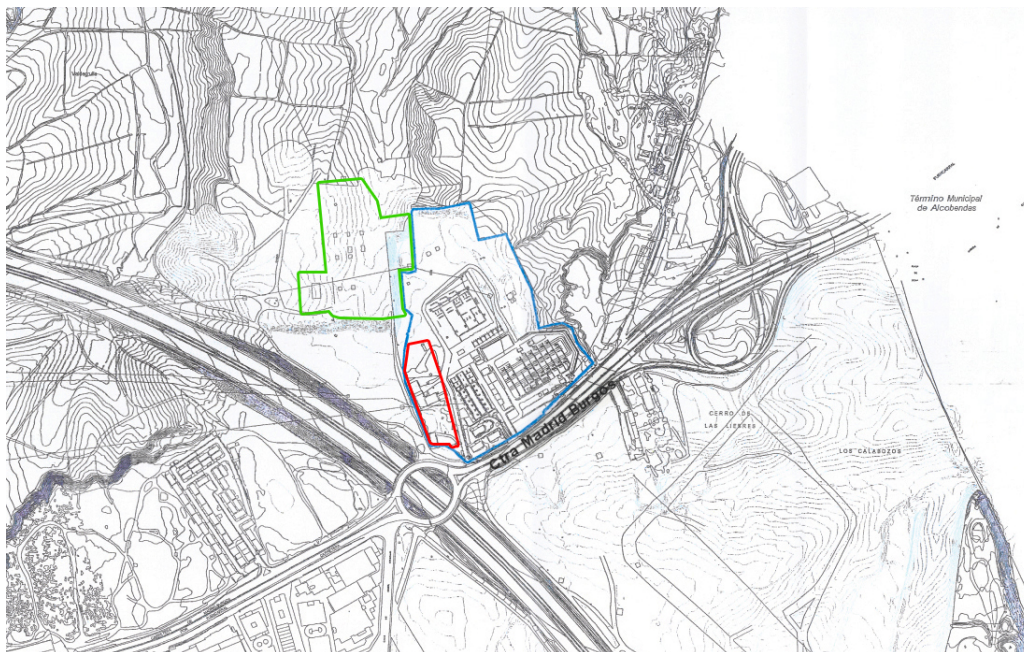


Figura 4.1: Plano original de la subestación de Fuencarral y sus posteriores ampliaciones y modificaciones.

Por defecto una subestación GIS es, dimensionalmente hablando, del orden del 10-25 % del espacio ocupado por una subestación AIS (Air Insulated Switchgear) [15]; comparando las dimensiones en plano de la subestación original a la intemperie con las de la novedosa subestación GIS podemos comprobar que es cierta la referencia mencionada.

En este caso, el paso al nuevo tipo de subestación formaba parte de un plan de modernización promovido por la empresa eléctrica, tuvo una inversión aproximada de 60 millones de euros y entraba dentro del convenio de modernización de la red eléctrica suscrito entre Iberdrola, el Ayuntamiento y la Comunidad de Madrid [16].

La brutal reducción de espacio empleado se debe a que este tipo de instalación permite que los interruptores y demás componentes de la misma funcionen de forma segura dentro de un espacio muy reducido. Al disponer de equipos compactos la superficie que ocupan representa la décima parte del espacio necesario para alojar una subestación convencional de intemperie.

En la instalación blindada los equipos son modulares, lo que facilita su ampliación y modificación y, al mismo tiempo, ofrecen una mayor fiabilidad de operación y requieren un menor mantenimiento, además de tener una vida útil más larga.

A continuación se muestra un esquema detallado de las instalaciones que componen la subestación de Fuencarral, haciendo hincapié en los detalles del parque GIS, de reciente construcción y que nos concierne en este documento.

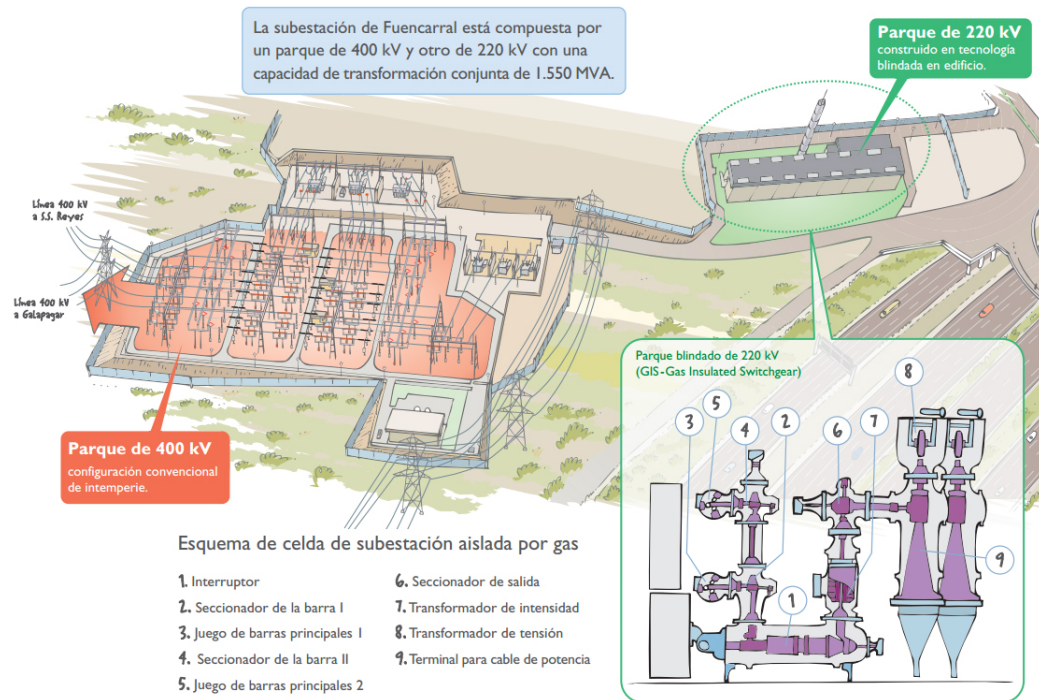


Figura 4.2: Esquema de toda la subestación de Fuencarral con el Parque blindado (GIS) de 220kV detallado [17].

Empleando una herramienta de medición (online de uso libre [18]) obtenemos las dimensiones aproximadas del edificio blindado, que serían aproximadamente $2401,17m^2$. A día de hoy, se desconoce la distribución interior de la subestación GIS del parque eléctrico de Iberdrola por motivos de seguridad y privacidad, pero podemos seguir una serie de patrones comunes a todas estas instalaciones alrededor del mundo. Para ello se muestra continuación un esquema de sección de un edificio GIS, que tiene un espacio de trabajo a la entrada que para nuestro caso despreciaremos, así como un largo de la estancia de maquinaria de 83,5m.

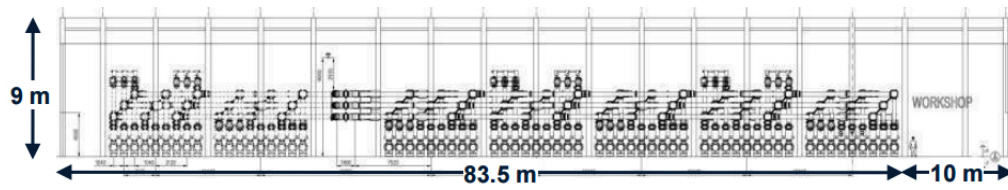


Figura 4.3: Sección de un Edificio GIS.

Consideramos, por tanto, un escenario de área $80m \times 30m = 2400m^2$ (largo \times ancho), la cual es una aproximación válida, así como una distancia de suelo a techo de $9m$, teniendo en cuenta que el sistema de transformación no podrá superar los $6m$ de altura.

4.2. Diseño de la solución

A continuación, nos pararemos a describir brevemente qué pasos fueron seguidos y por qué en el desarrollo de una solución para el problema planteado de detección y estimación.

4.2.1. Detección de Descargas Parciales

Siguiendo el planteamiento propuesto, nos encontramos en el escenario ficticio de una subestación GIS contenida en el interior de un edificio hormigonado, con un sistema de 4 antenas desplegado en cada uno de los laterales del recinto en pos de, en primer lugar, poder detectar la presencia de potenciales descargas parciales para más tarde obtener una localización aproximada de ellas.

Para ello, como ya hemos comentado con anterioridad, el sistema de detección debe tener la capacidad de haciendo una escucha del medio, tomar una decisión acerca de si una señal recibida en el receptor se trata o no de una DP. Esto no es un requisito arbitrario; nuestro sistema de detección de DP se encontrará haciendo escuchas al medio de manera continua, el cual se encontrará la mayor parte del tiempo en *silencio* relativo salvo que se produzca una de estas perturbaciones.

También podríamos tener en consideración ciertas interferencias potenciales, pero teniendo en cuenta la connotación teórica del proyecto y las condiciones de nuestro escenario (edificio de hormigón aislado), tomaremos unas condiciones simplificadas en las que tomamos la decisión de no incluir este tipo de interferencias al poder considerarlas irrelevantes.

Para comenzar lo que se debe buscar y determinar es el método óptimo de detección de DP, para ello haremos uso de la función de correlación cruzada en nuestro entorno de trabajo. Empleando esta función de manera conjunta a nuestras 3 señales clásicas propuestas (pulso triangular, pulso cuadrado, sinc) obtendremos unos resultados a analizar para estimar cuál de ellas da mejor resultado.

Estas señales tendrán un número de muestras determinado, elegido con anterioridad estudiando su forma respecto a una descarga aleatoria, para intentar obtener los mejores resultados (puesto que cuanto mejores sean mayor fiabilidad tendrá el sistema).

Una vez obtenidos y tengamos un sistema de decisión fiable pasaremos a hacer uso de él incorporándolo a otro más complejo, en el que se simulará la llegada de señales a las 4 antenas y en el que individualmente a cada una de ellas se tomará la decisión. De ese modo se puede ubicar en un eje temporal señales de tipo impulsivo que sustituyan e indiquen la ubicación de cada una

de las DP (de manera que podamos trabajar más cómodamente en procesos posteriores).

Es importante recordar que la aparición de las DP es aleatoria, y aunque es cierto que a medida que pasa el tiempo un foco de DP obtiene cierta periodicidad, esto no es suficiente para poder predecir la aparición de una de ellas. Por este motivo se afrontará esta situación de análisis con una estrategia basada en el uso de ventanas temporales de una duración determinada.

4.2.2. Localización de Descargas Parciales

Tal y como hemos visto en la sección anterior, se ha tomado la decisión de trabajar en un escenario inspirado en otro real, cuya planta tiene un área rectangular, y proponiendo una altura total de $9m$. Por otro lado la altura total del sistema de transformación GIS tendrá una cota máxima de 6 metros, dando por hecho entonces que las DP aleatorias que pudiesen aparecer no podrían generarse a más altura que esa, y con una cota mínima de $1m$ (espacio entre maquinaria y suelo).

En lo referente al área de posible generación de DP en el plano XY, se establece que habrá un margen entre maquinaria y muros de la estructura de $5m$, por razones de seguridad y para permitir la movilidad de operarios alrededor del sistema si se requiriese.

Tenemos por tanto que la descarga parcial a estudiar se generará con las siguientes componentes, con los posibles valores adjuntos:

- $DP_pos = [rand_ejex, rand_ejey, rand_ejez]$
 - $rand_ejex = [5m, 75m]$
 - $rand_ejey = [5m, 15m]$
 - $rand_ejez = [1m, 6m]$

Por otro lado, tenemos un sistema de antenas que distribuiremos en forma de rombo, de tal manera que cada elemento se sitúe en la mitad del largo de los muros del edificio. La altura de dichas antenas será dispar, de manera que cada elemento no comparta altura con sus dos contiguos pero sí con el elemento enfrenteado a él. Este criterio se ha tomado para evitar errores o situaciones imposibles (como dos soluciones) debido a la simetría en el plano XY que supondría disponerlas a la misma altura. En el Capítulo 5 se ahondará en este tema haciendo también un estudio de qué implicación tienen las diferentes alturas para el sistema desarrollado.

A partir de las condiciones anteriormente descritas y con ayuda de los desfases obtenidos en la parte de detección de la DP, el programa comenzará un proceso en el que, a partir de una DP estimada inicial (generada sabiendo a qué antena llega la propagación primero), se irá mejorando esta estimación mediante sucesivas iteraciones hasta conseguir un resultado que supongo un error mínimo y nos garantice un resultado veraz.

Capítulo 5

Desarrollo

5.1. Desarrollo en la detección de descargas parciales

Después de introducir las ideas de diseño necesarias y tener unos hitos fijados, en este capítulo abordaremos el desarrollo de la aplicación, así como problemas que se han encontrado (en los casos que aplique) y de qué manera se les ha dado una solución.

5.1.1. Fuente de los datos de DP empleados

A lo largo de este documento se referencia el uso de señales representativas de los diferentes tipos de DP, las cuales fueron capturadas en laboratorio forzando la aparición de las descargas. Dichas capturas fueron volcadas a diferentes ficheros, que al ser apropiadamente importados en Matlab nos ofrece un gran abanico de ejemplos. El acceso a estos archivos se consiguió gracias a la tutora del proyecto, que pudo facilitarlos ya que es co-autora de un artículo científico [19] resultado de investigaciones y pruebas al respecto.

En concreto los archivos se tratan de:

- **DP_corona**

Correspondiente a un array de 455 descargas tipo Corona de 200 muestras de longitud.

- **DP_interna**

Correspondiente a un array de 575 descargas tipo Interna de 200 muestras de longitud.

■ **DP_superficiales**

Correspondiente a un array de 571 descargas tipo Superficial de 200 muestras de longitud.

Archivo	Valor #1	Valor #2	...	Valor #N
Captura #1	(1,1)	(1,2)	...	(1,N)
Captura #2	(2,1)	(2,2)	...	(2,N)
...
Captura #M	(M,1)	(M,2)	...	(M,N)

Cuadro 5.1: Distribución en array de dos dimensiones para los valores capturados de las DP.

El código desarrollado podrá hacer uso de cualquiera de ellas indistintamente como DP generada, que tendrá que ser detectada en este bloque, pudiendo incluso diferenciarlas al finalizar el proceso. También haremos uso en el futuro de lo que denominaremos “descargas medias”, que consistirán en una única señal (array unidimensional) para cada uno de los tipos que obtendremos de promediar cada una de las columnas para todos los valores fila, es decir, crear una “descarga maestra” que sea la media de todas las descargas de ese tipo.

5.1.2. Identificación de una DP respecto al medio

Durante todo el proyecto trabajaremos con las señales medidas en laboratorio que hemos introducido anteriormente, correspondientes a descargas parciales con duración temporal en torno a 200pS y dimensionadas en señales digitales de 200 muestras, lo que nos da un tiempo de muestra $T_m=1\text{pS}$.

El sistema se compone de 4 antenas escuchando el medio para después poner en común los instantes en los que llega propagándose a cada una de ellas y trabajar en el futuro con sus desfases. Pero en esta etapa del proceso hablaremos del papel de cada antena por separado, que consiste en discernir si una señal recibida se trata de una DP o no, prestando atención a no caer en falsos positivos ni despreciar descargas como si no se trataran de tal.

Para ello se propone hacer un análisis mediante la correlación de la señal de referencia con la señal presente en cada instante en el canal por medio del uso de ventanas.

Como podemos ver en la Figura 5.1, las señales de descargas obtenidas tienen un lapso principal donde se concentran las fluctuaciones más características y, por tanto, que más información podrían aportarnos a la hora de realizar una correlación cruzada con otra señal. Esta ventana es típicamente de 50 muestras, lo que equivaldría a 50pS.

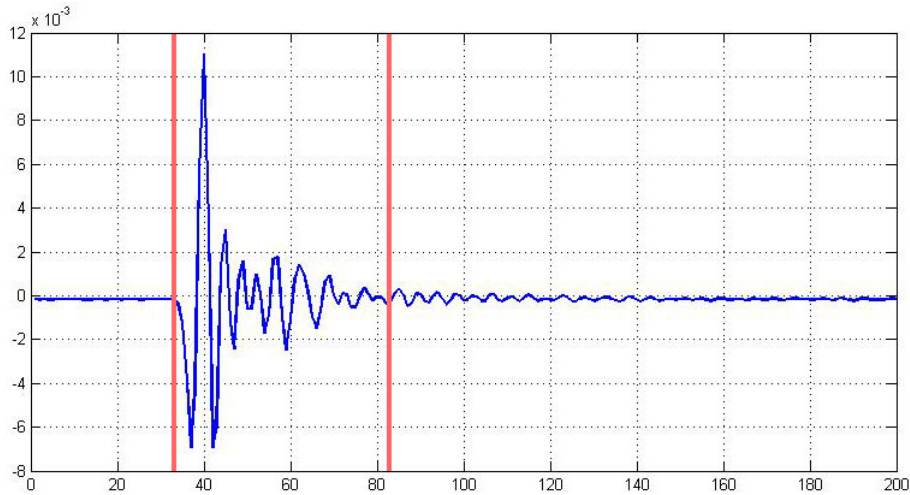


Figura 5.1: DP con ventana señalizando su lapso principal

Sin embargo el canal no nos ofrece información alguna de en qué momento una descarga parcial podría iniciarse, por lo que no puede elegirse el inicio del análisis arbitrariamente. Para solucionar este problema lo abordaremos con un análisis en ventanas intercaladas, con un tamaño máximo de ventana de 50

muestras, y con sus respectivos inicios separados por 25 muestras, de manera que la parte principal de una hipotética DP tenga siempre garantizado un análisis competente.

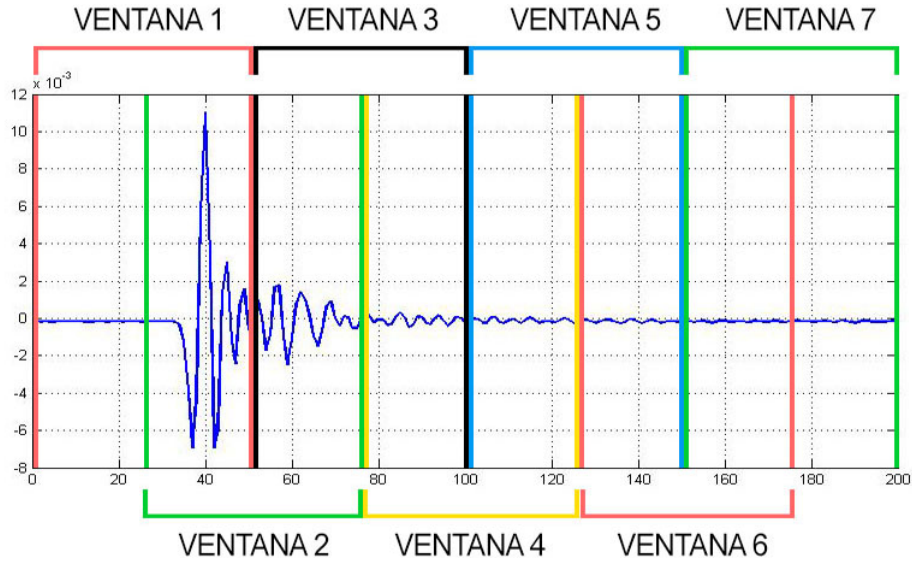


Figura 5.2: Separación en ventanas para análisis de la DP

En la Figura 5.2 podemos observar un ejemplo de esta división en ventanas del canal para su posterior análisis.

Correlación con señales clásicas

En esta sección se pretende hacer un análisis de los resultados que dan las funciones de correlación de una DP con 3 figuras clásicas y, de esta manera, estudiar si es viable su utilización en el proceso de detección.

Las pruebas que se realizaron consistieron en, teniendo 400 muestras de cada tipo de DP (Corona, Interna, Superficial), se hizo para cada una de ellas su correlación cruzada con cada una de las señales clásicas (pulso, sinc, pulso triangular). Para cada resultado de correlación se extrajo el valor más alto y se representaron todos esos máximos resultados para cada tipo de DP y señal, como podemos observar en Figura 5.3, Figura 5.4 y Figura 5.5, donde además se adjunta la media para facilitar su lectura (debido a los bruscos cambios que existen).

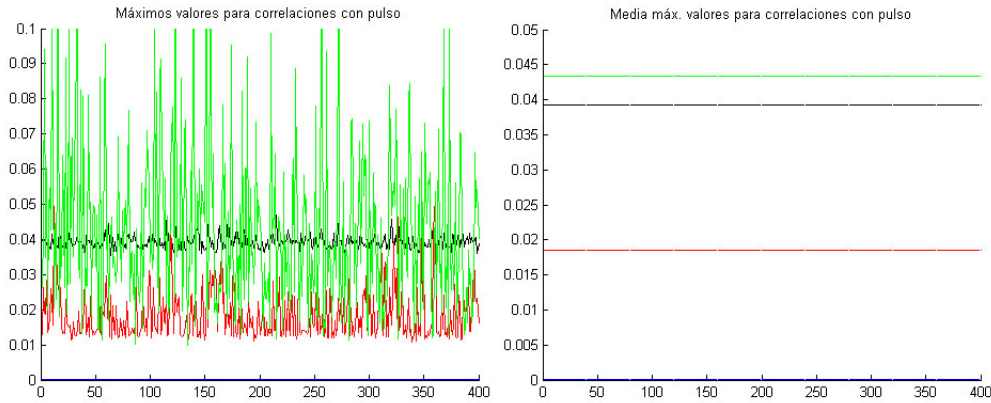


Figura 5.3: Resultados de correlación con señal pulso para cada tipo de DP (negra Corona, roja Superficial, Verde Interna) y la media de dichos resultados de correlación.

Como podemos observar, si estudiamos las medias, no hay ninguna señal clásica que nos sirva como herramienta definitiva; la señal sinc (Figura 5.7) dará muy buenos resultados para las DP Corona, no siendo así para los otros dos tipos. La señal pulso triangular (Figura 5.8) dará resultados similares a la anterior, incluso mejores para las DP Corona. Pero sin embargo será la señal pulso (Figura 5.6) la que en general dará mejores resultados, siendo muy buenos para DPs Interna y Corona, y normales para la DP Superficial.

Por otra parte, a priori no hay una forma de determinar a ciencia cierta de qué tipo es una DP detectada (detectará por su resultado de correlación cruzada que es una DP pero no qué tipo), no al menos con las señales propuestas. Si se interpretara que conocer este dato es de interés a la hora de detectar una DP se propone hacer un estudio con señales medias de cada

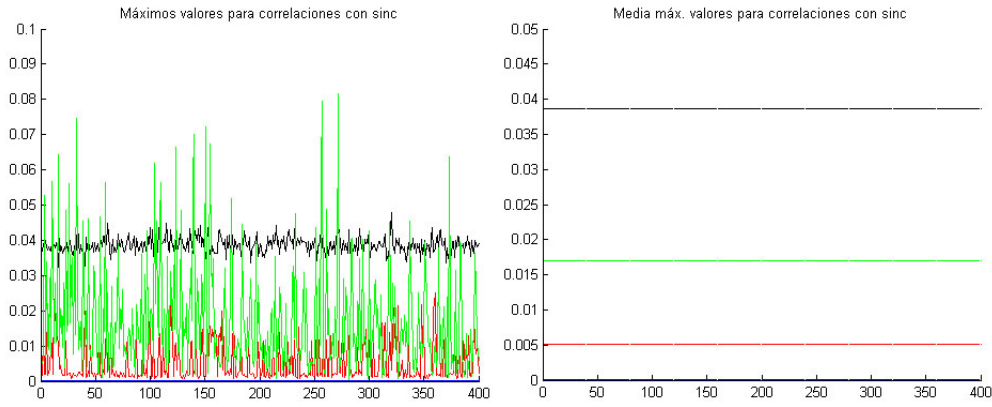


Figura 5.4: Resultados de correlación con señal sinc para cada tipo de DP (negra Corona, roja Superficial, Verde Interna) y la media de dichos resultados de correlación.

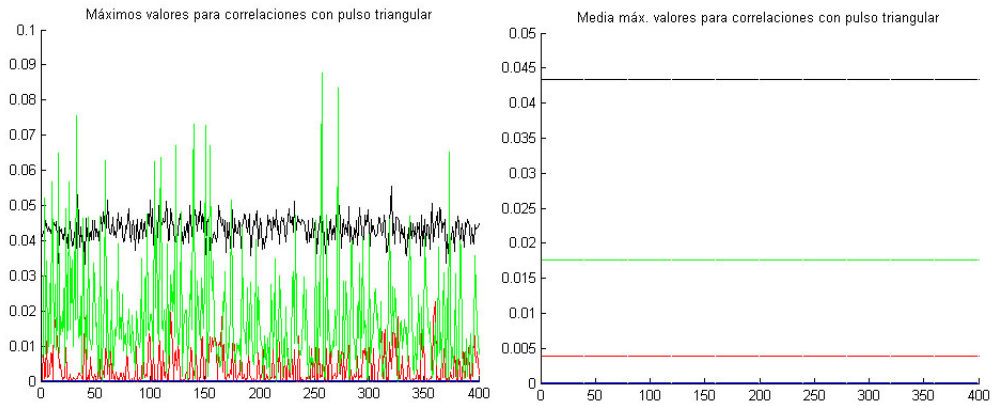


Figura 5.5: Resultados de correlación con señal pulso triangular para cada tipo de DP (negra Corona, roja Superficial, Verde Interna) y la media de dichos resultados de correlación.

tipo; a partir de los archivos de datos de Señales DP que manejamos, obtenemos la media de todas las señales para sus 200 muestras, es decir, para cada una de las posiciones que dan un valor a las señales, hacer su valor medio con el resto de señales almacenadas. De esta manera se obtendríamos 3 señales (una para cada tipo) que podríamos llamar *señales DP maestras*, las cuales servirían como segundo vector a correlar con una DP desconocida para revelar su naturaleza (dará un altísimo valor para la correlación cruzada con la señal maestra de su tipo, no siendo tan alto para los otros dos casos). En Figura 5.6, Figura 5.7 y Figura 5.8 podemos observar estas señales comparadas con una DP aleatoria de su tipo.

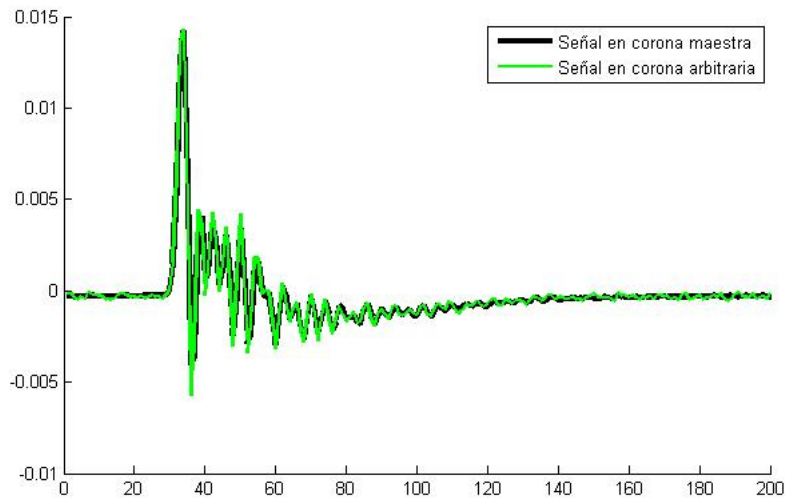


Figura 5.6: Comparación de señal de DP en corona aleatoria y su maestra.

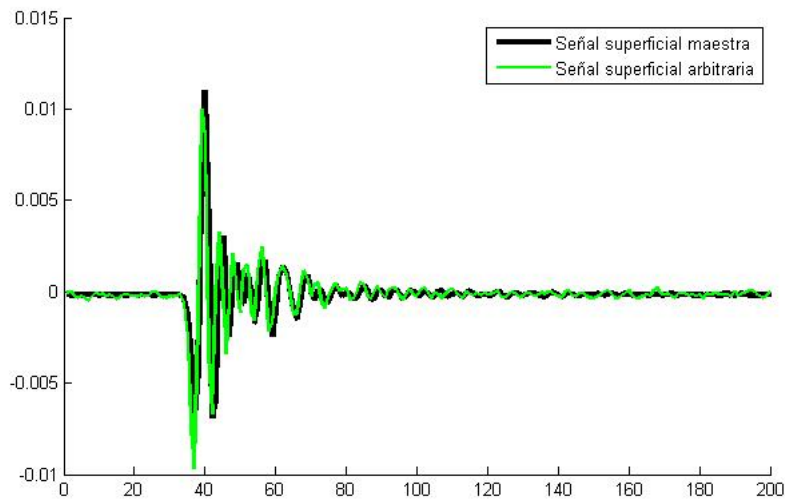


Figura 5.7: Comparación de señal de DP superficial aleatoria y su maestra.

Cálculo del desfase entre Descargas Parciales

Mediante el proceso de correlación cruzada en ventanas de la señal pulso (elegida mejor opción) con las lecturas de las diferentes antenas, podremos llegar a una determinación de los instantes en los que la DP desconocida llega a ellas. Esto es así ya que cuando dicha señal pulso se correla con

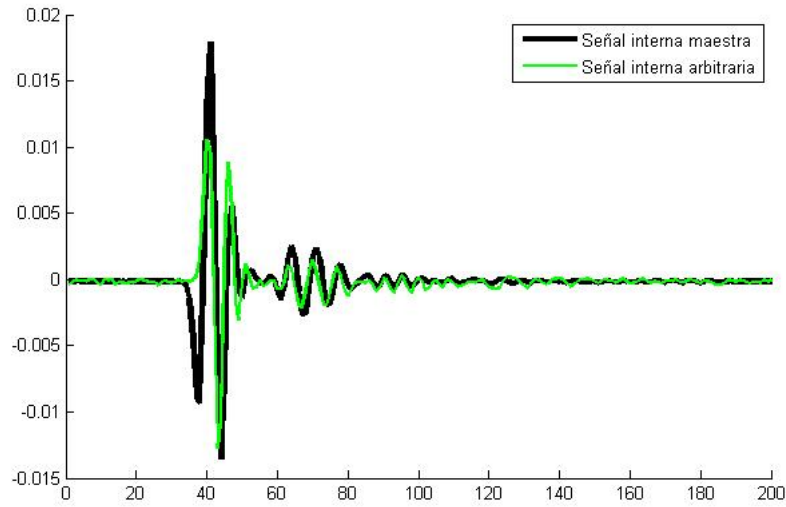


Figura 5.8: Comparación de señal de DP interna aleatoria y su maestra.

una ventana en la que está presente una DP cualquiera aleatoria, los valores resultado se disparan para esa determinada posición (de hecho, el uso de enventanado permite que dicho pico máximo se aprecie hasta en 2 ventanas diferentes, reforzando el planteamiento). Será entonces cuando el detector estime que en un determinado instante está llegando una DP a una antena dada (dicho instante marca la posición de máxima correlación, no el inicio de la DP, pero dicho aspecto no debe preocuparnos porque trabajaremos con las diferencias temporales). De tal manera, cuando en el eje se hayan expuesto 4 respuestas impulsivas de la mano del detector indicando los 4 puntos de máxima correlación de una DP en cada una de las antenas, podremos obtener las diferencias de tiempo con las que la DP llega propagada a una u otra antena, lo que es clave para nuestro futuro desarrollo.

5.2. Desarrollo de la localización iterativa

En esta sección vamos a detallar los pasos seguidos para el desarrollo del algoritmo. Al final de la misma y contenido en la Figura 5.14 observamos un diagrama de flujo que recopila el funcionamiento básico del código final. Todo este programa, irá integrado en una interfaz gráfica, comentada en la Sección 5.3.

Todos los pasos aquí descritos fueron desarrollados íntegramente en lenguaje de programación Matlab en su entorno de desarrollo tal y como se comentó brevemente en el comienzo del capítulo.

Preparación del escenario

En este primer paso del programa, en caso de que se tratase de la primera iteración, se crearía el escenario definiendo los ejes, representando las 4 antenas en sus posiciones correspondientes (valores no aleatorios, comentado en 4.2.2) y trazando en el plano XY las regiones de decisión de cada una de las antenas. Estas regiones de decisión se tratan de 4 áreas que delimitan la antena más cercana para cualquier punto del plano XY, y fueron conseguidas con simetrías de las antenas descritas mediante las mediatrices de cada combinación de pares de antenas.

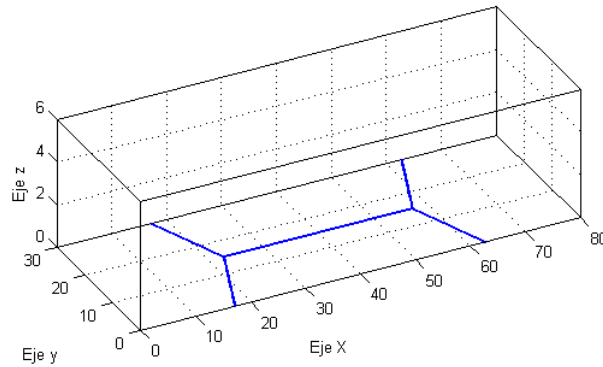


Figura 5.9: Escenario con las regiones de decisión en el plano XY.

En caso de que no se tratara de la primera iteración, se ejecutarían los comandos típicos de limpieza del workspace (ya que datos de anteriores ejecuciones son irrelevantes) y también de las figuras empleadas.

La razón para este comportamiento es evitar que los handles de la interfaz gráfica, que se encuentra en un nivel superior, se pierdan y las figuras desaparezcan durante unos instantes; limpiar el escenario y mantener las figuras sin perder los ejes se considera la opción más recomendable.

Generación de la DP aleatoria y su representación

Se generan valores aleatorios de XYZ para definir la posición que tendrá nuestra descarga parcial generada a partir de determinados criterios:

- Eje X. Este valor (`rand_ejeX`) será generado aleatoriamente en un rango comprendido en $[5m, 75m]$.
- Eje Y. Este valor (`rand_ejeY`) será generado aleatoriamente en un rango comprendido en $[5m, 15m]$.
- Eje Z. Este valor (`rand_ejeZ`) será generado aleatoriamente en un rango comprendido en $[1m, 6m]$.

Por tanto la posición quedará determinada en el vector:

`pos_DP=[rand_ejeX, rand_ejeY, rand_ejeZ]`

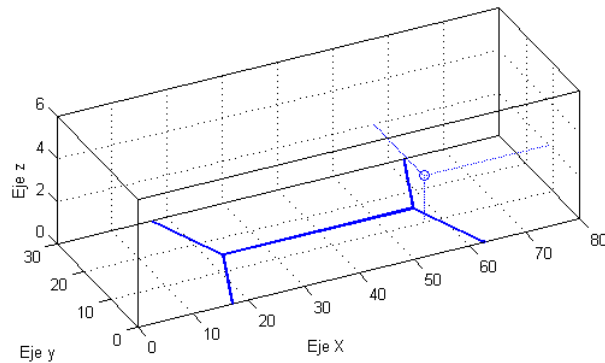


Figura 5.10: Representación de la descarga generada en el escenario 3D.

Por supuesto, este dato de posición de la descarga generada no es conocido de cara al cálculo desarrollado, limitando su utilidad a labores de análisis y comparación de resultados.

Obtención de las distancias reales DP-antenas y decisión de la antena más próxima a ella

En este punto se obtienen las 4 distancias pertinentes entre la descarga parcial generada aleatoriamente y las antenas, para ello teniendo todos los valores de coordenadas hacemos uso de la ecuación de la distancia euclídea entre dos puntos en el espacio, definida como:

$$d(P1, P2) = \sqrt{(P1_x - P2_x)^2 + (P1_y - P2_y)^2 + (P1_z - P2_z)^2}.$$

Donde:

- $P1$: Punto espacial #1, definido por sus componentes $P1_x, P1_y, P1_z$.
- $P2$: Punto espacial #2, definido por sus componentes $P2_x, P2_y, P2_z$.

Es importante mencionar que, tal y como pasaba con la posición de la DP, estos datos no son conocidos, al menos no de cara al cálculo desarrollado y por ende tampoco lo son las distancias entre la descarga y cada una de las antenas. En todo caso de hacer uso de ellos será únicamente para labores de análisis, comparación de resultados y/o determinación de la antena más cercana a la descarga en caso de que no se active la opción de capturar ese dato desde el módulo de detección (es decir, un caso más teórico dando por hecho condiciones de estimación en el tiempo de la descarga sin errores).

Por otra parte, si quisiéramos capturar ese dato del módulo de detección seguiría siendo perfectamente viable determinar cuál de las antenas es la primera en recibir la propagación de la descarga e identificarla como tal. Como ya hemos mencionado este proceso se explicó en la sección 4.2.1. previamente.

El hecho de saber qué antena actúa como flag (primera antena a la que llega la señal propagada y que define el instante de partida $t = 0$ para el programa) ante la DP es importante sobretodo para que el código ejecutado sea el apropiado (al no ser un escenario simétrico en todas sus dimensiones habrá que definir pequeñas diferencias, a la hora de jugar con los desfases de tiempo, que variarán en función de la antena flag).

Obtención de distancias basada en diferencia de tiempos

Una vez se ha determinado qué antena actúa como flag (instante $t_0 = 0$) para el inicio del programa de localización el resto de ellas van recibiendo dicha señal con diferencias temporales que fueron determinados con anterioridad, de esta manera se asignarán consecutivamente los instantes t_1 , t_2 y t_3 , y por consiguiente los tiempos t_{01} , t_{02} y t_{03} . Estos tiempos no son más que la diferencia entre los instantes t_1 , t_2 y t_3 respecto a t_0 y son el único dato que a priori podemos introducir en el sistema para emplear en el proceso.

Conociendo estos tiempos y teniendo en cuenta que $d = tc$, obtendremos las distancias de desfase d_{01} , d_{02} y d_{03} .

En la Figura 5.11 vemos un ejemplo de lo recién explicado, teniendo que la primera antena a la que llega la DP es la 3 ubicada en el punto $[0,40]$ del plano XY.

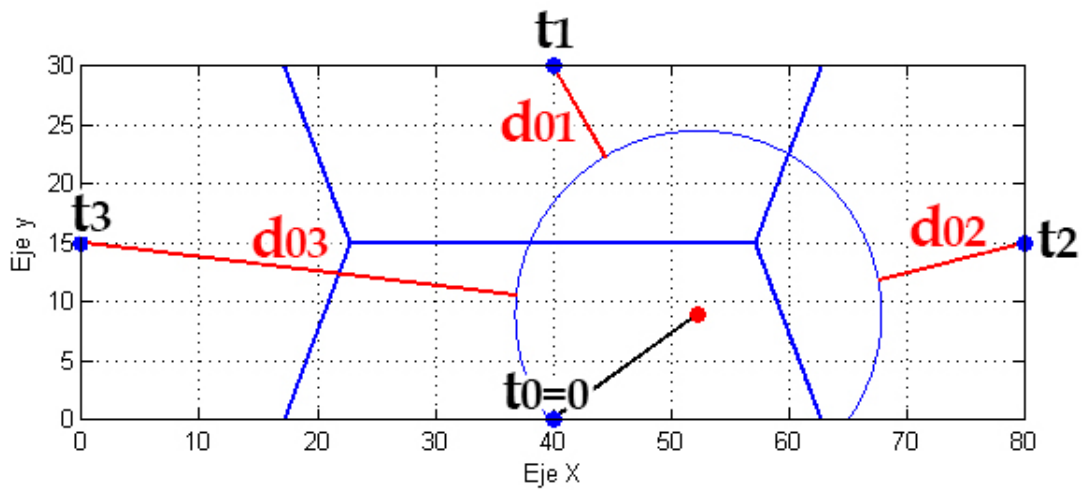


Figura 5.11: Representación de DP (rojo), junto a los tiempos de llegada a las antenas y sus diferencias (datos en negro) de distancia desde que llega a la primera antena (datos en rojo).

Creación de DP estimada en función de la antena más próxima y su región de decisión

El hecho de determinar en el punto anterior la antena más cercana a la DP (es decir, la que antes detecta su presencia) nos permite poder garantizar una región del escenario donde sabemos que la DP se encontrará. Estas regiones son áreas delimitadas por las líneas trazadas en el plano XY de la Figura 5.12, y cuyas dimensiones fueron determinadas por principios de simetría entre cada una de las antenas receptoras.

En función del área elegida se creará una DP estimada aproximadamente en su centro gráfico y con una altura media. Por lo tanto para cada una de las regiones de decisión se crearían las siguientes DP estimadas:

- Región Antena 1. DP_estimada = [40, 22.5, 3]
- Región Antena 2. DP_estimada = [70, 15, 3]
- Región Antena 3. DP_estimada = [40, 7.5, 3]
- Región Antena 4. DP_estimada = [10, 15, 3]

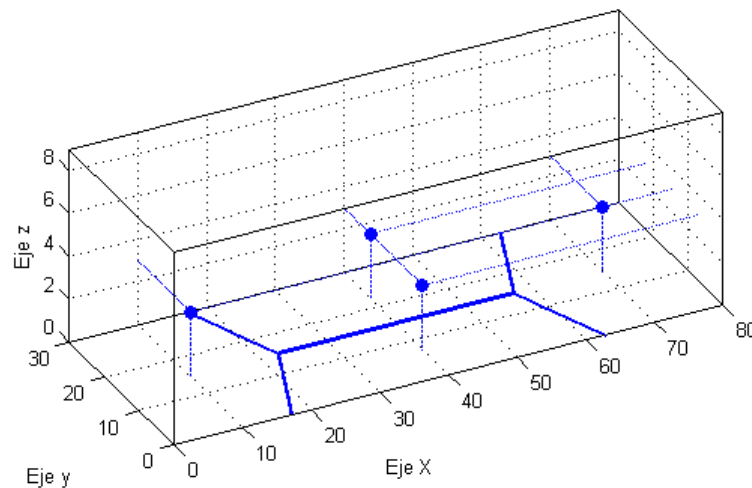


Figura 5.12: Representación de los puntos estimados que son creados para cada región de decisión.

Hay que puntualizar que debido a que finalmente se tomó la decisión de no disponer las antenas a la misma altura, las regiones de decisión no serían esos tramos para todas las alturas, si no que variarían ligeramente. Sin embargo, debido a la menor contribución que supone un cambio en el eje Z respecto a los otros dos y recordando que estos puntos son **aproximados**, podemos determinar que dicha aproximación es adecuada.

Error entre las diferencias de DP real y DP estimada

En este apartado obtendremos, a partir de DP, los las diferencias temporales y las diferencias de distancias de la DP estimada de forma análoga a cómo los obtuvimos anteriormente de la DP original.

Por lo tanto ahora el programa también dispondrá de los datos de distancia d_{01est} , d_{02est} y d_{03est} .

El siguiente paso es operar con todos los datos obtenidos de distancia de desfase, de manera que si la DP estimada estuviera exactamente en el lugar de la DP original, la diferencia de sus desfases en la fórmula de distancia euclídea sería 0 o aproximadamente 0 si fuera una estimación cercana. Se puede ver en la expresión:

$$error\ cuadrático = (d_{01} - d_{01est})^2 + (d_{02} - d_{02est})^2 + (d_{03} - d_{03est})^2$$

Obtención del error de distancia en metros

Es interesante también obtener en este punto la distancia entre la DP original y la estimada para poder comprobar qué error se ha cometido en la estimación. De nuevo, y como habíamos visto con anterioridad, el programa no tiene acceso a este valor al no saber la posición de la DP real, pero nos sirve de cara a conclusiones y a ver resultados.

Comprobación del umbral de error (puede resultar fin de algoritmo)

Después de obtener el valor del error cometido al comparar las distancias de desfase (en general y para las primeras iteraciones será alto debido a la aleatoriedad de la estimación) el programa tomará la decisión de si se ha encontrado una aproximación fiable de la posición de la DP o no. Dicha decisión vendrá dada por un umbral, de manera que si el valor de error está por encima del mismo habrá que seguir iterando o comenzar a iterar en caso de que sea el principio del programa.

Por otro lado si el error estuviera por debajo de dicho umbral se tomará la DP aproximada como válida y finalizará el programa. Por lo general un resultado válido por debajo del umbral implica en las pruebas realizadas un error máximo de 1cm; este y otros matices los comentaremos en la Sección 5.4 más en detalle.

Variaciones omnidireccionales

En caso de que la DP estimada fuera descartada como válida por superarse el umbral comenzará un proceso de iteraciones en las que el programa intentará mejorar los resultados con pequeñas variaciones de posición y repitiendo para cada una de ellas el proceso llevado a cabo hasta ahora.

El criterio seguido para generar estas variaciones es, tomando la DP estimada actual, generar **otras 6 estimaciones idénticas** y posteriormente incrementar o decrementar unas distancias determinadas por un factor en cada uno de los ejes. De manera que tendríamos:

- Incremento en Y:

$$DP_est_alt_N(i, 2) = DP_est_alt_N(i, 2) + i * factor$$
- Incremento en X:

$$DP_est_alt_E = DP_est_alt_E(i, 1) + i * factor$$
- Decremento en Y:

$$DP_est_alt_S = DP_est_alt_S(i, 2) - i * factor$$
- Decremento en X:

$$DP_est_alt_O = DP_est_alt_O(i, 1) - i * factor$$
- Incremento en Z:

$$DP_est_alt_UP = DP_est_alt_UP(i, 3) + i * factor$$
- Decremento en Z:

$$DP_est_alt_DOWN = DP_est_alt_DOWN(i, 3) - i * factor$$

La variable i será la condición de recorrido de un bucle for con valores $i=1,2,3$, de manera que se crearán un total de 18 estimaciones alternativas, las cuales en grupos de 6 se verán afectadas por un incremento o decremento de la misma magnitud (el segundo grupo tendrá una variante 2 x factor y el tercero una variante 3 x factor).

En la Figura 5.13 podemos observar una representación de estas variaciones en el espacio.

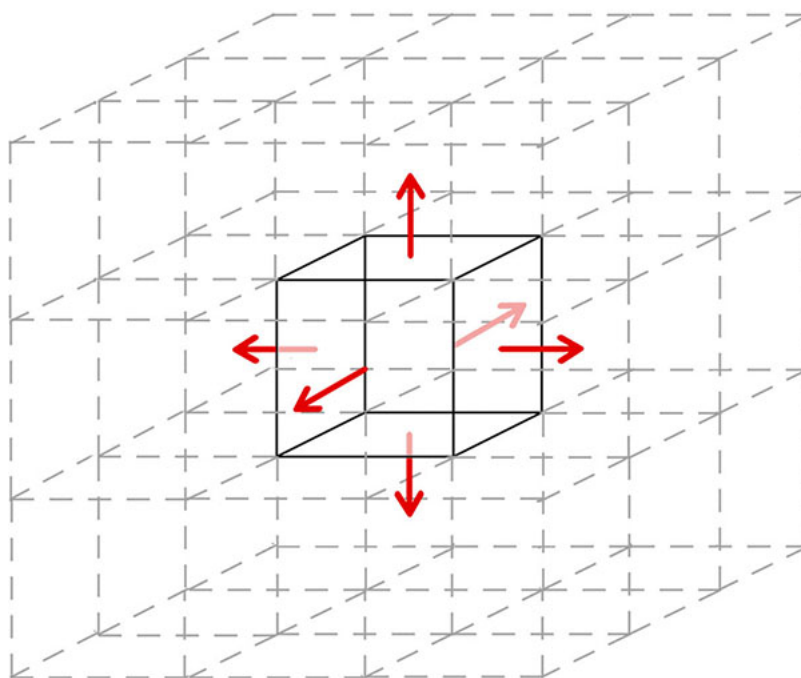


Figura 5.13: Variaciones de la posición original en el espacio.

Adicionalmente se determina que la DP estimada sin variaciones a partir de la cual se crearon las nuevas pasa a denominarse `DP_est_alt_X`, y su presencia se explicará a continuación.

Comprobación de los límites de las variaciones

Se ha de comprobar también que todas las variaciones generadas estén dentro del margen establecido para nuestro escenario, de manera que si alguna de ellas quedara fuera de rango debido al incremento o decremento en uno de los ejes, el programa le asignaría el valor más cercano permitido dentro del escenario (así se evitan situaciones imposibles como considerar una alternativa viable una DP estimada fuera del edificio).

Error entre el desfase de distancia real y los nuevos estimados

De igual manera que se hizo en uno de los pasos anteriores, se ha de obtener el error del desfase real con los estimados (a diferencia del caso anterior que sólo había que comprobar uno ahora se han de comprobar los 18 recién obtenidos).

Elección o descarte de la estimación propuesta

Al finalizar el proceso anterior, se buscará cuál de ellos ha dado un menor error, es decir, cuál se ha aproximado más con su variación a la DP original que deseamos determinar.

En este punto si el menor de los errores se debe a una de las 18 estimaciones alternativas de DP (anteriormente explicadas) el programa guardará dicha variación como nueva mejor estimación (es decir se sobrescribirá con su valor el de *DP_estimada*) y volverá a comenzar todo el proceso con una nueva iteración (y de esta manera se irá mejorando la aproximación en cada iteración).

Por el contrario si el mejor resultado de error (más bajo) se debe a *DP_est_alt_X* la decisión será reducir el valor de **factor** a una magnitud menor (por ejemplo $factor = factor \times 0,5$). Esto se debe a que si esta DP se considera mejor aproximación a la final que las variaciones, se da por hecho que el valor de la variable factor supone un incremento demasiado grande dada la situación, por lo que habrá que reducirlo y seguir buscando en incrementos más pequeños. Después de realizar estas acciones mantendría esta descarga estimada como (todavía) mejor estimación y volvería a comenzar el proceso con una nueva iteración).

Finalmente, y después de un proceso de sucesivas iteraciones, llegaremos a una estimación que cumpla con el umbral mencionado anteriormente, por lo que habremos llegado a una solución fiable a la estimación buscada.

5.2.1. Diagrama de flujo del proceso iterativo

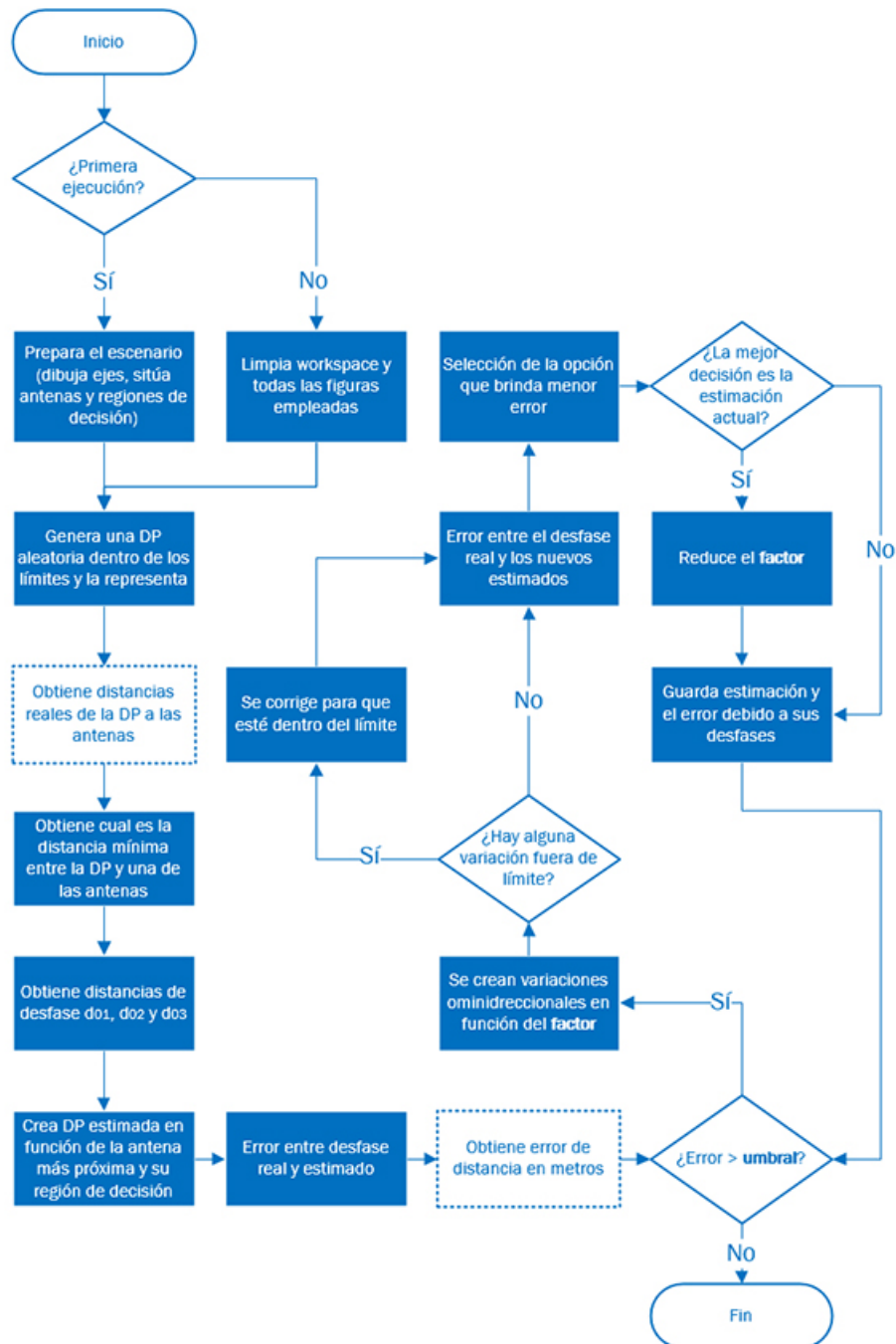


Figura 5.14: Diagrama de flujo que resume el comportamiento del localizador de DP.

5.3. Presentación de los datos

5.3.1. Interfaz visual del programa

Desarrollo de la interfaz en Matlab y usos

Se ha creado para la ocasión una interfaz visual de usuario con la que presentar las capacidades y resultados del programa.

En primer lugar observamos la pantalla principal de la interfaz en la Figura 5.15, a continuación enumeramos sus principales partes:

1. Figura principal:

En este espacio se representará el escenario, antenas, DP generada y la estimación si nos encontramos en la primera pestaña. En el caso de la segunda pestaña se representarán dos gráficas que nos permiten ver cómo evolucionan el error de distancia y el error cuadrático de nuestra aproximación con cada iteración que pasa (Figura 5.17). En el caso de la tercera pestaña se hace una representación del orden de llegada de la señal a cada una de las antenas en un eje de muestras, donde cada muestra corresponde a $1mS$ (Figura 5.18) y alternativamente uan figura donde el detector ya ha decidido sobre la presencia de DPs.

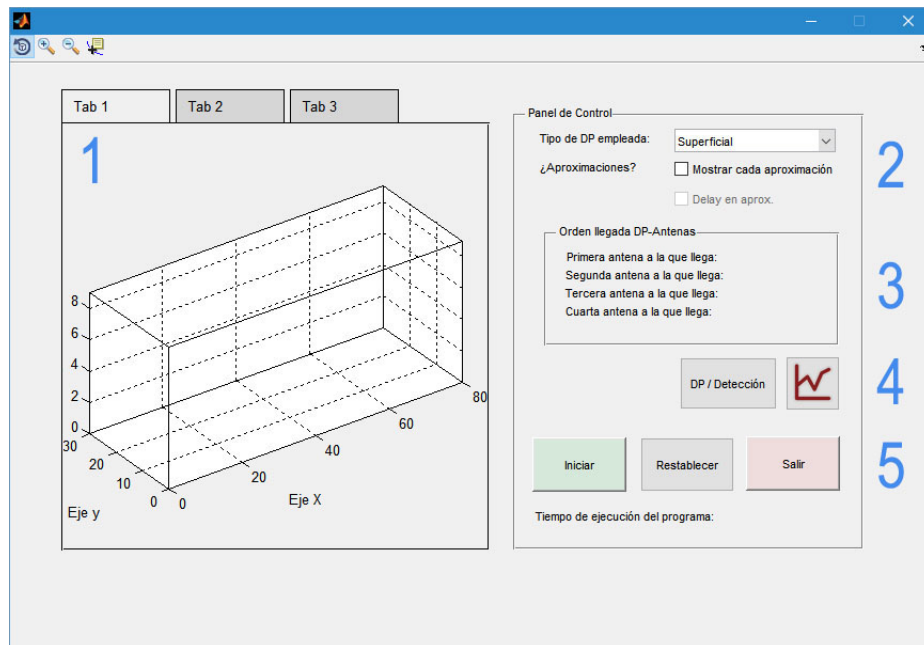


Figura 5.15: Pantalla principal de la interfaz.

2. Parámetros de la simulación:

En esta parte se permite al usuario elegir el tipo de señal que se empleará en el proceso, así como si quiere representarse cada una de las estimaciones del proceso (una por cada iteración) para poder apreciar la evolución del resultado. En caso de que esta última opción esté activada se desbloquea la posibilidad de ver la evolución progresivamente con un pequeño delay entre cada iteración (Figura 5.16).

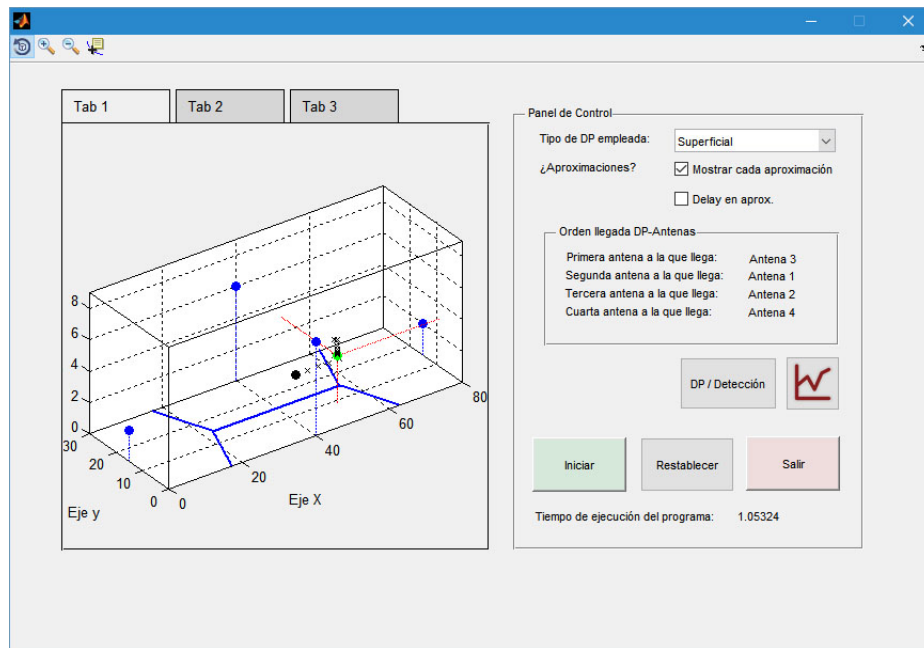


Figura 5.16: Pantalla principal con el proceso ejecutado.

3. Orden de llegada DP-Antenas:

Un pequeño apartado en el que se ve reflejado el orden en el que ha llegado la DP propagándose a cada una de las antenas.

4. Opciones extra:

En primer lugar el botón DP/Detección intercambia la figura de la tercera pestaña, alternando entre una vista de las lecturas de la DP en las antenas en el dominio del tiempo y entre otra vista con dicho eje una vez el detector toma la decisión sobre si hay DPs o no (si hay 4 respuestas impulsivas ha detectado la DP correctamente en las 4 antenas). En segundo lugar el botón derecho abre una nueva ventana que nos muestra los recursos que ha requerido el proceso, en cuanto a CPU y memoria RAM se refiere (Figura 5.19), gracias a una clase programada por un tercero [20].

5. Botones de Inicio, Restablecimiento y Salida:

Estos botones controlan el programa, cuando se pulsa el botón izquierdo se pone el algoritmo en marcha y mostrará los resultados, pudiendo haber pequeñas diferencias de una ejecución a otra si los parámetros opcionales están activados. Al pulsar el segundo botón se reinician todos los valores y se limpian las figuras. Al pulsar el tercer botón se finaliza el programa y se cierran todas las ventanas.

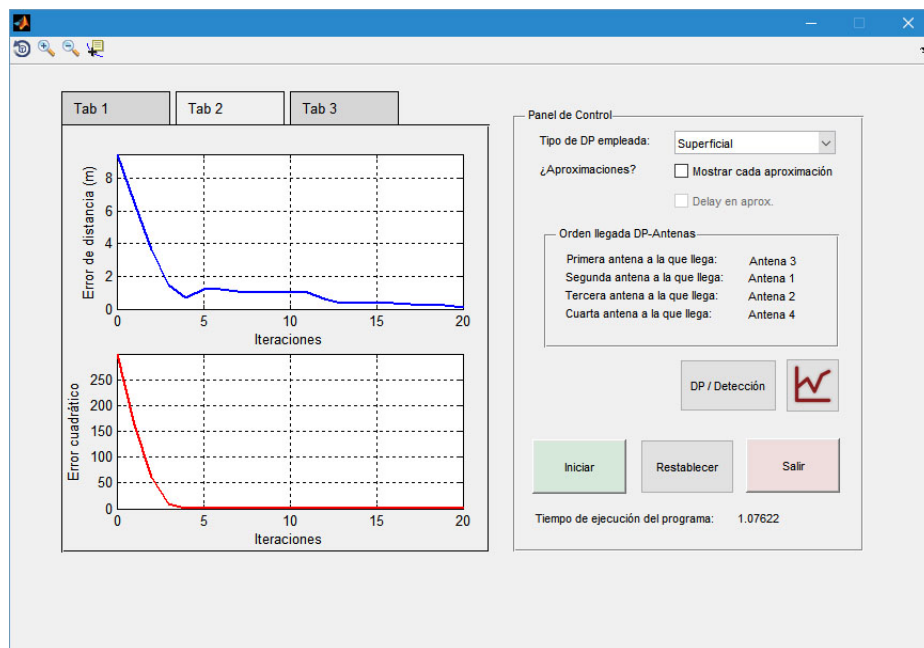


Figura 5.17: Pestaña de evolución de error cuadrático y de distancia con las iteraciones.

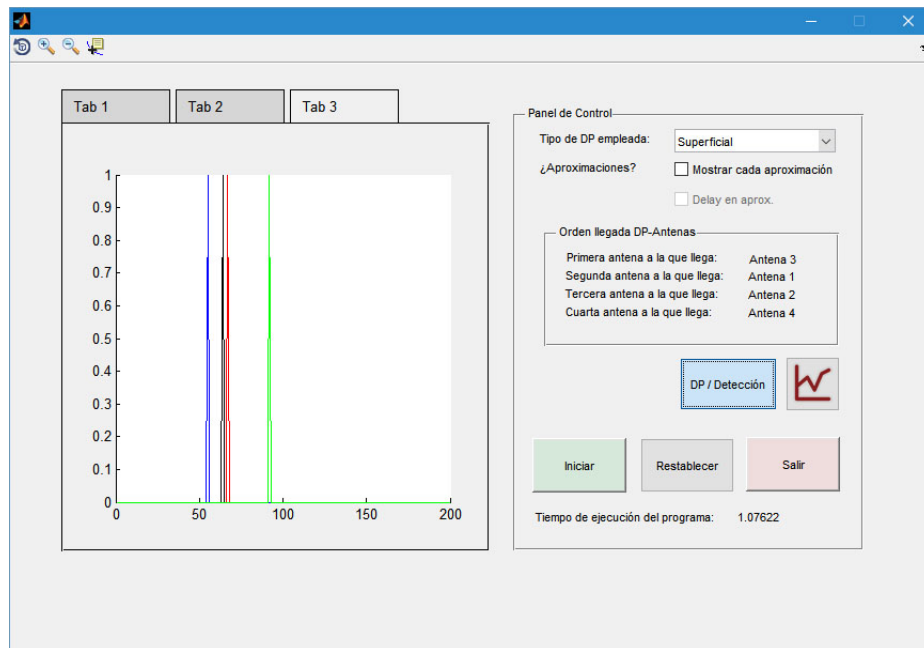


Figura 5.18: Pestaña respuestas impulso representando las posiciones de la DP en cada una de las antenas.

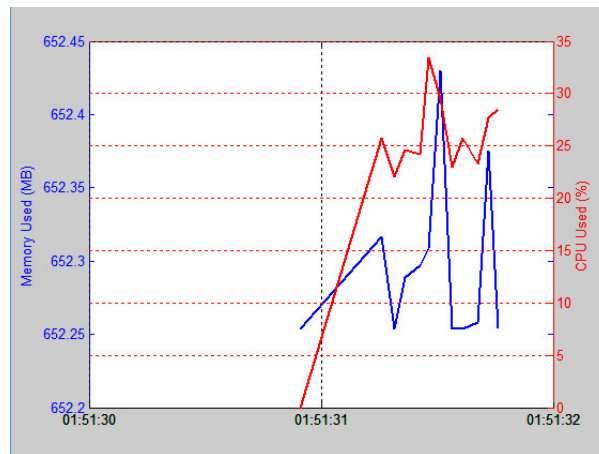


Figura 5.19: Ventana con los recursos empleados para ejecutar el programa.

5.4. Alternativas de diseño

- Introducción de un número mayor de antenas en el sistema

Una de las alternativas que se barajó fue la introducción de un mayor número de antenas. Esto permitiría reducir la extensión de las regiones de decisión, y por consiguiente generar descargas estimadas iniciales más cercanas a la posición real que desea conocerse, por lo que también se reduciría el número de iteraciones o ciclos necesarios de aproximación y por tanto se ahorraría en tiempo y recursos. Sin embargo conociendo el actual desempeño del sistema propuesto, que da excelentes resultados, no resultaba crítico ahorrar en estos aspectos a cambio de la introducción de un mayor número de elementos, puesto que la diferencia de unas décimas de segundo o el bajo ahorro computacional (ya que de por sí el actual es bajo) no excusaban un gasto adicional.

- Alturas alternativas para las antenas del sistema

Se planteó la idea inicial de disponer las antenas del sistema a la misma altura en el Eje Z, pero rápidamente se tomó la decisión de introducir una desigualdad en dicha altura debido a los problemas que podría acarrear la simetría en lo referente a las distancias a las antenas.

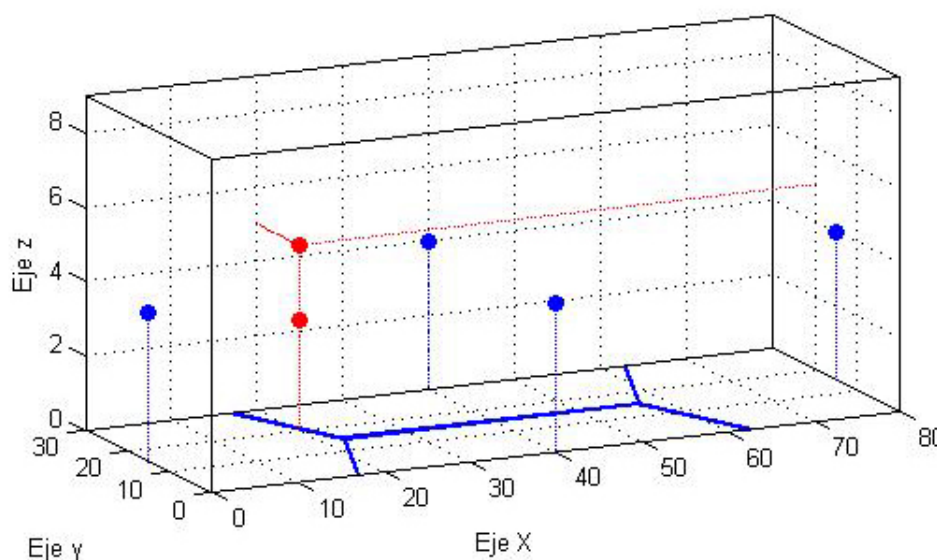


Figura 5.20: Disposición a la misma altura del conjunto de antenas en el escenario.

Como podemos observar en la Figura 5.20, de haberse mantenido las antenas a idéntica altura y generar una DP tendríamos otra DP simétrica,

estando las dos a la misma distancia del plano $XY_{Z=3}$ (se ha elegido $Z=3$ para este ejemplo).

Esto gráficamente implica dos posibles soluciones, pero introducido en nuestro sistema podría acarrear un mal funcionamiento, como por ejemplo resultados de localización erróneos en varios metros en el eje Z e incluso bucles infinitos debido a la posibilidad de no converger en un resultado veraz.

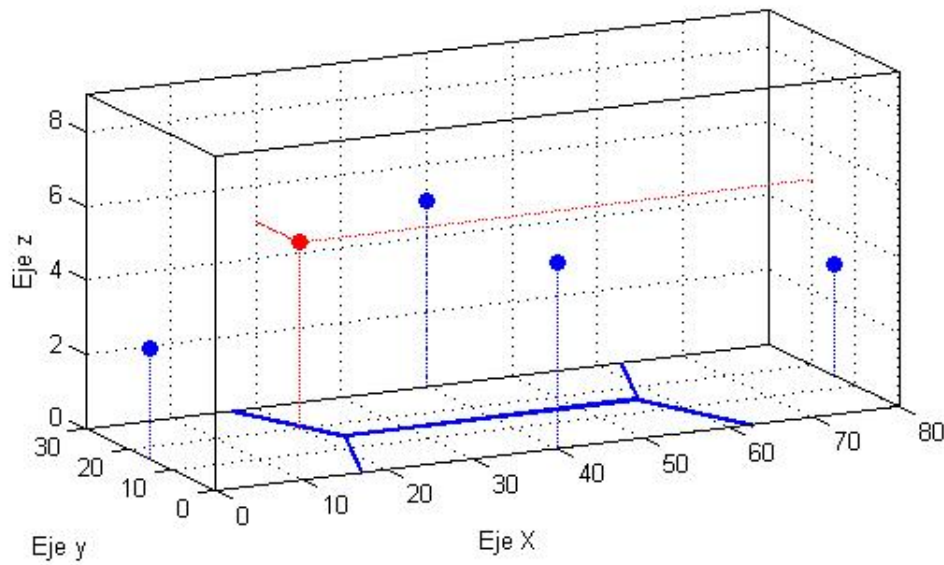


Figura 5.21: Disposición a diferente altura del conjunto de antenas en el escenario.

Finalmente se optó por disponer las antenas de lados del escenario enfrentados a la misma altura, pero a diferente altura a las antenas de lados contiguos (Figura 5.21). Este cambio impide que se generen simetrías en el plano XY para cualquiera de sus alturas. Los buenos resultados conseguidos durante este proyecto justifican sobradamente esta decisión.

Capítulo 6

Resultados

6.1. Resultados del proceso

Una vez completado el programa que ha sido desarrollado, pasamos a comprobar y comentar la eficacia de sus resultados basándonos en una de sus ejecuciones:

La primera parada es comprobar los resultados que nos brinda el módulo detector; para un eje temporal determinado (supuesto eje temporal, aunque trabajaremos con muestras), se genera una DP aleatoria cuya llegada a cada una de las antenas se ve reflejada en la Figura 6.1, algo que podemos ver a simple vista pero no el decisor, que tendrá que hacer el cálculo de las correlaciones entre el pulso y la lectura de cada antena en ventanas para determinar si está sucediendo una DP o no.

En la Figura 6.2 se puede apreciar que el proceso ha detectado correctamente la DP en las 4 antenas ya que ha representado la posición de su valor máximo mediante respuestas impulsivas en el eje de muestras. En ambas figuras se corresponde la Antena 1 con el color negro, la Antena 2 con el rojo, Antena 3 con el azul y la Antena 4 con el verde, por lo que el orden de llegada en este caso será #3, #1, #2, #4.

Se entiende entonces que la región de decisión que se utilizará en el módulo de localización es la correspondiente a la antena 3, y que las diferencias de distancia d_{01} , d_{02} y d_{03} se obtienen de las diferencias de tiempo t_{01} , t_{02} y t_{03} , de fácil obtención a partir de los resultados previos ya que tenemos el valor adecuado del tiempo de muestra ($Tm = 1pS$).

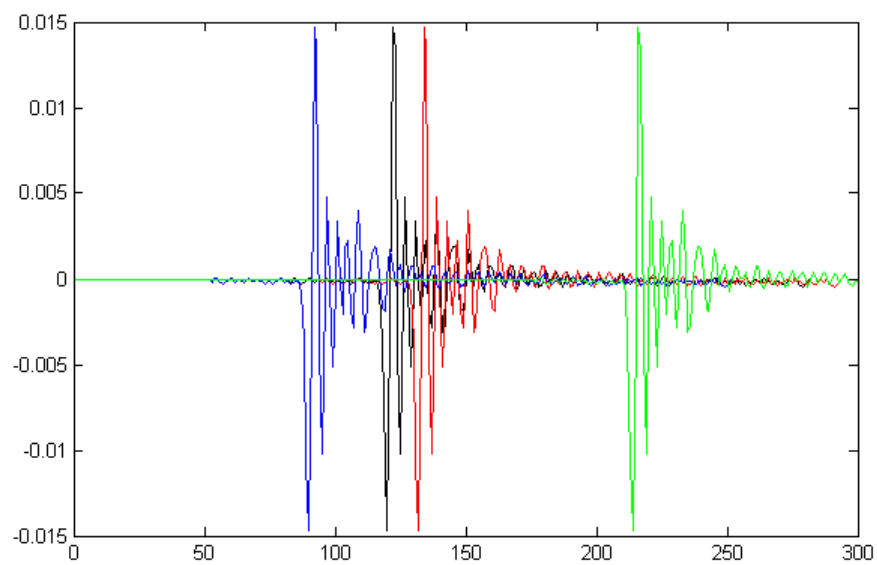


Figura 6.1: Lectura en el tiempo de las señales recibidas por las diferentes antenas.

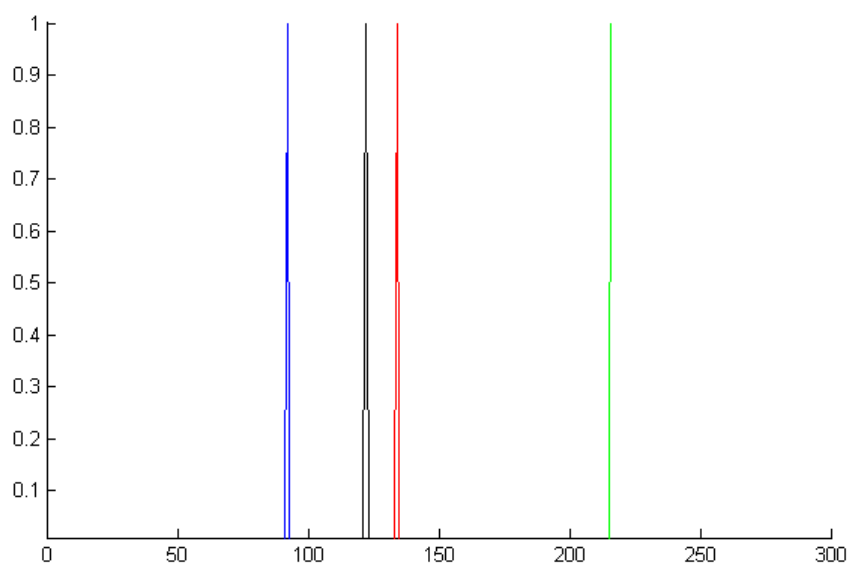


Figura 6.2: Decisión sobre la llegada de la DP a cada una de las antenas.

En el siguiente paso pasamos a analizar el bloque localizador; en el escenario se sitúa la DP generada aleatoriamente (Figura 6.3, dato invisible para el programa) y a continuación comienza el proceso iterativo, en el que en primer lugar sitúa la DP estimada inicial correspondiente a la región de decisión #3, para ir mejorando dicha estimación paso a paso (lo que se se puede apreciar por las cruces dibujadas para cada iteración, Figura 6.4). Finalmente proporciona un resultado representado como un punto verde (superpuesto a la DP original) que es muy preciso.

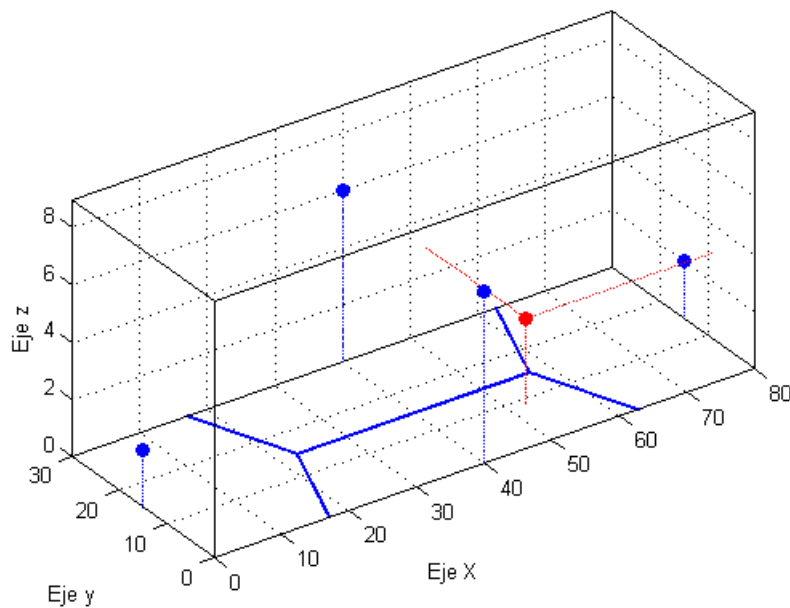


Figura 6.3: Ubicación de la DP para cada antena según el detector.

Concretamente en esta simulación se tienen los siguientes datos:

Número de iteraciones totales = 25
 Error estimación final (metros) = 0.0321m = 3.21cm
 Umbral error cuadrático = 0.0001
 Paso de reducción de umbral: 0.5 x umbral

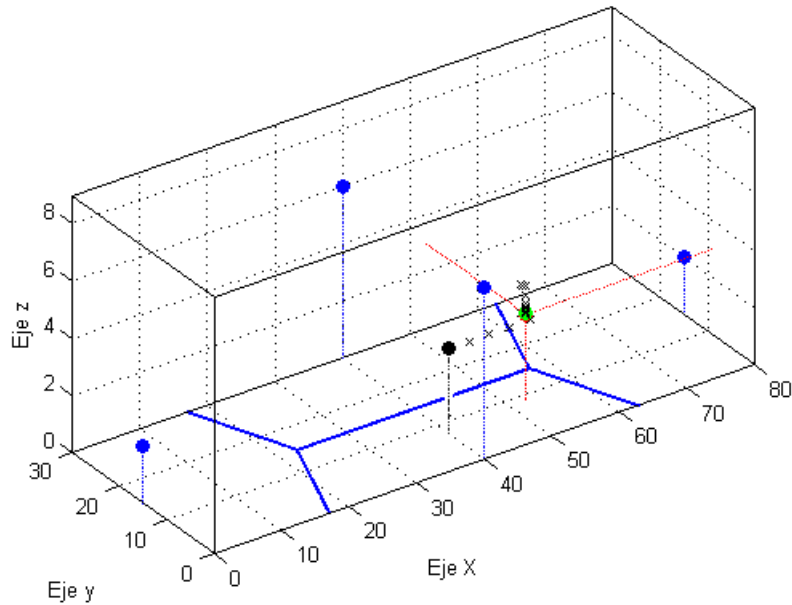


Figura 6.4: Representación del escenario en la prueba del programa

Por otro lado, en la Figura 6.5 se puede observar una comparativa para cada una de las iteraciones de cómo evoluciona el error de distancia y el cuadrático. Es importante aclarar que a cada iteración sólo está garantizado la mejora del error cuadrático, no siendo así para el error de distancia (por ello se puede apreciar un ligero incremento) aunque por lo general evolucionan con tendencia similar. También es destacable que se itera hasta conseguir bajar el error cuadrático del umbral deseado, pero ya en torno a la iteración 14 se consiguió un error de distancia de unos $30cm$, que no es un resultado muy exacto pero sí aproximado.

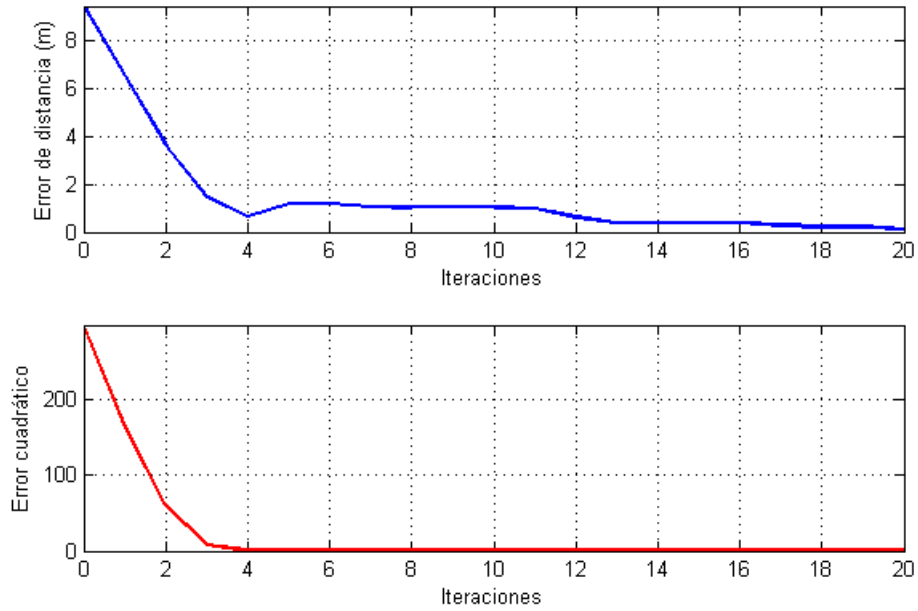


Figura 6.5: Comparativa para cada iteración del error cuadrático y de distancia.

Por tanto podemos concluir que el sistema es solvente y converge bien para todas las simulaciones realizadas, ofreciendo buenos resultados.

6.2. Errores debidos a cambios en los parámetros del sistema

Ahora analizaremos los diferentes comportamientos y errores que implica el introducir cambios en los parámetros del sistema variando la altura de las antenas:

Como comentamos en su momento, la introducción de antenas a diferente altura es beneficiosa de cara a eliminar problemas de simetría como pudiera ser una doble solución, que traducido en nuestro algoritmo resultaría en aproximaciones realmente malas o un proceso que no convergería. Sin embargo no habíamos analizado hasta ahora los resultados para diferentes tipos de altura. A continuación exponemos diferentes supuestos, con los resultados medios para 500 diferentes ejecuciones del programa en cada caso, siendo z_1 el valor de altura en metros del par de antenas ubicado más abajo y z_2 el valor de altura en metros del par de antenas ubicado más arriba.

	$z_1 = 3, z_2 = 5$	$z_1 = 2, z_2 = 6$	$z_1 = 1, z_2 = 7$
Tiempo medio (s)	0.09	0.05	0.04
Iteraciones medias	295	153	135
Error distancia medio (m)	0.02404	0.00573	0.00414

Cuadro 6.1: Tabla de comparativa para diferentes alturas de antenas.

De estos resultados se concluye que, como sospechábamos, una mayor distancia en altura entre pares de antenas aporta mejores resultados, y cuanto menor sea esta diferencia en altura empezaremos a tener peores resultados tanto en iteraciones y tiempo empleado como en error de distancia final a la DP.

Capítulo 7

Conclusiones y líneas futuras

7.1. Conclusions

Tests performed in the previous chapters, and their results lead to the conclusion that the system designed and developed for the detection of partial discharges and their estimation, fulfills the goals established at the beginning.

The results provided for the detection of partial discharges are positive. After studying the viability of using classic signals to match the signals arriving to the antennas, and comparing both using the sliding window process of correlation functions gives excellent results, providing an effective method for locating the arrivals of the generated partial discharges in a time axis to each of the antennas arranged in the set of antennas.

Regarding to the location of partial discharges, the program developed fulfills the required robustness, and it converges into an accurate solution when the conditions and parameters are suitable (the value of the factor, the antennas have a different height among them, the threshold of the quadratic error has been properly chosen...).

Finally, it has been achieved a low average number of iterations per location of a partial discharge, which lightens the algorithm, as has been proved in the performance results (a large computational charge would consume a lot of time and resources of the program, which would be costly and unproductive). Optimizing the results that much was only achieved due to the criteria for setting decision regions, discarding the large range of possibilities of the scenario. In some cases, if necessary, the value of the factor that generates alternative estimations was modified for the calculations, which is a double goal since the approximation was made using small variations of the distance towards the previous iterations, giving as result negligible errors when parameters were properly chosen.

7.2. Líneas futuras

■ Introducción de modelos de interferencia del medio reales

La primera parada en el camino del trabajo futuro debería ser la introducción de algoritmos que nos permitan discernir las señales electromagnéticas, generadas por las descargas parciales, del resto de interferencias reales del espectro radioeléctrico, como son las señales de la tecnología Wi-Fi o las emisiones de televisión, pudiendo así maximizar las garantías de funcionamiento en un escenario de característica más próximas a la realidad.

Para ello habría que llevar a cabo un sensado y estudio de las anomalías presentes en una captura del espectro para decidir, posteriormente con algoritmos, si se trata realmente de la presencia de una descarga parcial.

■ Desarrollo del programa para dispositivos móviles

También sería interesante complementar el sistema con la integración de un dispositivo móvil que expusiera los resultados en vivo en un plano de localización. Esto cobra mayor sentido en escenarios más amplios como pudiera ser una central AIS, de manera que los operarios pudieran interpretar en un mapa cartográfico orientado según su punto de vista el lugar aproximado donde se está produciendo una DP, lo que sería una gran ventaja al no tener que leer los resultados en un terminal fijo que limitara en agilidad el proceso. Esto sería posible con la exportación de los resultados a una interfaz móvil, procedimiento viable mediante la comunicación TCP/IP del software del equipo y del terminal móvil[21]. Una vez ingresados los datos y resultados finales la idea concluiría en presentarlos en mapa cartográfico (como pudiera ser Google Maps) mediante las APIs propietarias.



Figura 7.1: Prototipo de la interfaz de la aplicación móvil.

Capítulo 8

Coste y gestión del proyecto

En este capítulo se incluye una detallada lista de los diferentes costes relacionados con el desarrollo de este proyecto. De igual manera, y en relación con las potenciales posibilidades de comercialización del sistema, se incluye una estimación con unos hipotéticos costes de producción.

Finalmente, en la sección de gestión del proyecto, se desglosarán e ilustrarán los tiempos y procedimientos del proceso incluyendo gráficos y registros tomados durante el proceso de elaboración.

8.1. Presupuestos y costes

El montante total de gastos será desglosado en dos grupos diferentes, costes directos y costes indirectos:

- **Costes directos:** Se incluyen materiales, equipos o recursos humanos involucrados (salarios pertinentes). Este primer grupo supone la mayor parte del presupuesto del proyecto.
- **Costes indirectos:** Incluidos gastos de alquiler o servicios. Suponen aproximadamente el 20 % de los costes directos

Aplicable de aquí en adelante, es importante mencionar que todas las cantidades referenciadas en este documento serán expresadas en la moneda del Euro (€), redondeadas al alza en caso de que fuera necesario.

8.1.1. Presupuesto y material empleado

En esta sección se expone de forma detallada el presupuesto del proyecto, teniendo en cuenta los precios de los elementos materiales en el momento la realización de la memoria del proyecto, sin aplicar en ellos ningún tipo de devaluación.

■ Costes materiales

- Equipo informático para el desarrollo

El ordenador elegido para el desarrollo de este proyecto es de montaje propio (y no manufacturado), y consta de las siguientes piezas:

Producto	Descripción	Coste (€)
Procesador	Intel Core i5-4690 @3.5GHz (64bits)	219
Placa base	Gigabyte GA-B85M-D3H	67.95
Memoria RAM	8GB Kingston HyperX	110
Monitor	BenQ RL2455 LED 24"	189€

Cuadro 8.1: Descripción del equipo informático empleado

- Servicios de conexión a Internet

Dichos servicios fueron proporcionados por la ISP Telefónica S.A. consistiendo en:

Producto	Descripción	Coste/mes (€)
Conexión	Fibra óptica <i>Fusión Contigo</i> 300Mb	(6×) 62
Router	Comtrend 5813	67.95

Cuadro 8.2: Descripción de los servicios contratados a la ISP.

■ Costes personales

Los siguientes salarios han sido establecidos siguiendo el criterio descritos en el Estudio de Remuneración de 2014.

-Salario de supervisor/consejero:

Salario correspondiente a la tutora de este proyecto, Matilde Pilar Sánchez Fernández:

$$\frac{65000}{12 \times 4 \times 5 \times 8} = 33,90 \text{ euros/h}$$

$$\text{Salario final: } 15h \times 33,9\text{€}/h = 509 \text{ €}$$

-Salario de Ingeniero Junior:

Salario correspondiente al desarrollador Carlos de la Calle Fernández, como figura de Ingeniero Junior.

$$\frac{26000}{12 \times 4 \times 5 \times 8} = 13,60 \text{euros}/h$$

Salario final: $282h \times 13,60\text{€}/h = 3835 \text{€}$

8.1.2. Hoja de costes

Producto	Coste (€)	T. uso/devaluación	Coste real (€)
Costes Fijos			
Ordenador	396.95	5 meses / 18 meses	110.27
Router	39.85	5 meses / 30 meses	6.64
Conexión FO	6×62	-	372
Monitor	189	5 meses / 10 meses	94.5
Salario consejero		-	509
Salario Ingeniero J.		-	3835
			SUBTOTAL= 4928
Costes Variables			
			VARIABLES= SUBTOTAL×0,2 = 986
			COSTE TOTAL = 5914 €
			COSTE TOTAL + TASAS (18 %) = 6980 €

Cuadro 8.3: Costes totales del proyecto, con y sin tasas.

8.2. Plan de gestión del proyecto

Con el objetivo de alcanzar las metas esperadas en este proyecto, así como se recopiló la información adecuada, se realizó una presentación y defensa, también fue desarrollado un plan de organización al inicio de este proceso. Este plan de organización se vio afectado por cambios lógicos en el desempeño de una tarea como esta, como cambios en los tiempos esperados (por no ser suficientes) o introducción de tareas no previstas en un inicio. Como resumen englobador de todo el proceso, los pasos seguidos y los hechos más importantes que han marcado el proceso podrían resumirse de la siguiente manera:

- **Exposición de ideas y elección en común de la temática del trabajo:** Esta tarea comenzó en Septiembre de 2015. Se trató de determinar a partir de una petición del alumno (trabajo relacionado con localización) las bases que establecieran la temática del proyecto. Finalmente, se estudió por ambas partes la propuesta de la tutora sobre un trabajo basado en DPs, analizando las capacidades que ofrecía la temática.
 - Periodo: Septiembre 2015, 15h.
 - Tiempo total de reuniones: 3h.
- **Documentación e investigación:** Una vez se la idea principal del proyecto fue tomando forma, comenzó la fase de documentación e investigación por parte del alumno, empleando los recursos facilitados por la tutora así como otras bibliografías e información. Se siguieron acordando reuniones de puesta al día para supervisar los progresos en esta búsqueda de información.
 - Período: Octubre 2015, en torno a 30h. de trabajo personal.
 - Tiempo total de reuniones: 2h.
- **Diseño de la solución:** Cuando se tuvieron claras las ideas y se había investigado lo suficiente al respecto, comenzó la primera fase del desarrollo, el diseño de una solución para el problema de detectar y localizar una DP. El planteamiento inicial (que buscaba una solución basada en la geometría) fue descartado por limitaciones y por no poder ofrecer un resultado lo suficientemente cercano al esperado. Finalmente se encauzó el diseño con una segunda y definitiva alternativa, que es la definida a lo largo de este documento.
 - Período: Octubre-Noviembre 2015, 20h.
 - Tiempo total de reuniones: 2h.

- **Desarrollo de la solución:** Una vez se validó el diseño propuesto comenzó la fase de desarrollo en sí, cuya planificación puede dividirse en varias etapas.
 - Pruebas varias con los archivos de DPs facilitados, 5h.
 - Pruebas y desarrollo de un proceso de correlaciones cruzadas, buscando conseguir un detector de DPs óptimo, 25h.
 - Creación de un escenario 3D con sus respectivos elementos (regiones, antenas, ejes adecuadamente acotados), 7h.
 - Desarrollo e implementación de un algoritmo iterativo que permita localizar mediante aproximaciones una DP aleatoria, 65h.
 - Creación de una interfaz gráfica para ordenar los códigos desarrollados, que los conectara y mostrara sus resultados de una forma sencilla y eficaz, 15h.
 - Modificaciones pertinentes en función de lo acordado en reuniones, 15h.
 - Período: Diciembre-Enero 2015, las horas anteriormente descritas.
 - Tiempo total de reuniones: 3h.
- **Reuniones finales de puesta al día:** Diversas reuniones para poner al día el estado del proyecto, revisando su etapa final y encaminando ideas relevantes que hubo que tener en cuenta de cara a la documentación.
 - Período: Enero 2016.
 - Tiempo total de reuniones: 2h.
- **Documentación:** Su comienzo real fue en torno a Diciembre de 2015 cuando el proyecto se encontraba en fases finales, pero el grueso de horas empleadas para documentar el proyecto fueron las descritas a continuación.
 - Investigación sobre el estado del arte del tema propuesto (definición científica, orígenes, regulación, tecnologías actuales), 15h.
 - Tareas de documentación sobre el planteamiento y diseño de una solución (escenario planteado, escenario real que sirvió de inspiración, introducción a las subestaciones GIS, pasos propuestos a seguir de cara al desarrollo de un método detector y otro localizador de DPs), 15h.
 - Desarrollo de ambos métodos, detector y localizador, criterios seguidos, estructura del algoritmo, interfaz gráfica, 25h.
 - Estudio de resultados y conclusiones, así como documentación de los costes, presupuestos y gestión. 15h.

- Período: Enero-Febrero 2016, 70h. en total.
- Tiempo total de reuniones: 3h.

8.2.1. Diagrama de Gantt

A continuación se facilita un diagrama de Gantt que resume los tiempos, anteriormente descritos, de las fases del proceso:

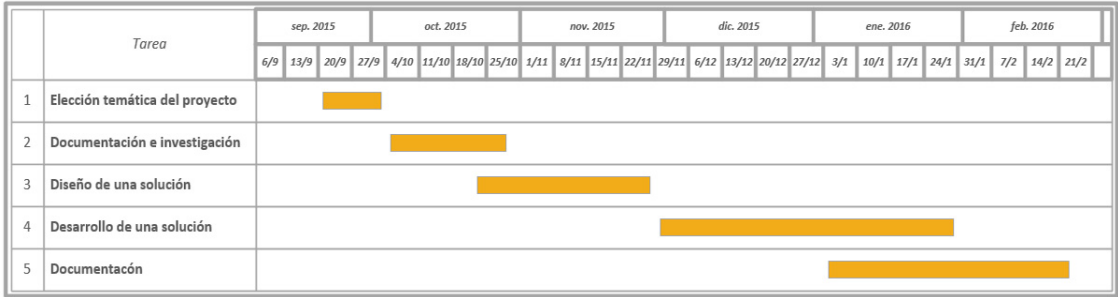


Figura 8.1: Diagrama de Gantt.

Appendix A

Extended abstract

This essay is just a brief review of a real development project whose purpose is implementing an easy system for sensing, detecting and locating partial discharges in the radio-electric environment. Encouraged to offer a faithful reflection of the real research, the document provides a generalized view of the problematic and resolution of a set of tasks followed in order to provide the reader a detailed idea on what partial discharges are, how they are currently treated, and how they could be easily tackled.

Firstly, a theoretical view of partial discharges will be offered, in order to give an approach of the meaning of this concept, and also the causes and consequences that comes with. Dipping into the historical evolution of this phenomenon will bring an idea on how has it been solved in the past few years, and which its the impact in society.

Dating back to XVII century, when first manifestations of this phenomenon were made, investigations were bounded to the study of electrostatic energy. It was later, by late XVIII when electric sparks were firstly associated to the concept of partial discharges and since then, a series of researches and scientific publications were made, contributing to enforce the importance of this concept across the years. In 1960, when the first commercialised devices capable of detecting partial discharges were released, a new market rose characterised by a high diversity, in the prototypes and the technologies applied for the detection and estimation of partial discharges.

The reasons behind the great amount of devices commercialised and the acclaimed interest for putting more and more into the market, are attached to the risks and consequences of partial discharges when they are not detected on time: from great economic losses, and technological losses, and even human losses due to possible fires or explosions in plants. In fact, it becomes clear

that this phenomena should be contained soon when it is manifested, due to the fatal consequences attached

It is an essential condition to guarantee a perfect behaviour of all the components inside an electric flow system, and the only way to reach it is assuring the insulation of each component so it is feasible to resist against overload of voltage. This is important, given the relationship of the nature of partial discharges, that are inherited to small breakages, cavities or tiny imperfections existing in the insulator, that sour little by little the material and leading to the electrical failure previously described.

One of the goals of this projects is developing a system that guarantees the security among the equipment pieces and components, as well as preserving the physical integrity and security in the work environment, according to the legislative rules. The development implemented should also be consistent with the conditions regarding the prevention of partial discharges, thinking about the economical costs, that should be reduced using a cost effective implementation and equipment.

Following the same guideline, the main issue approached in this project is analysing the nature of partial discharges, attempting to improve their behaviour while a better knowledge of them is acquired for developing later a real detection method of partial discharges by effective correlation, by means of classic signals that can expose when a discharge is arriving to an antenna over a set of antennas, and after locating it in space, creating an estimation of where the discharge is happening exactly. The result of where the discharge is located should be provided after the previous calculations, and providing an effective solution with a reduced error rate. It should also provide some other information regarding the discharge, such as its properties.

In order to offer a wider vision of the problem in this brief resume, it is important to remark that a partial discharge is defined as a breakage on a dielectric, as well as the subsequent release of energy caused by the previous event. It is located in a tiny space of a solid or liquid electric insulator, and it is usually caused by imperfections on the fabric process of the insulator engine; or by the wear and tear occasioned after an intense usage, which is a common situation due to the stress caused by the high voltage submitted to the material, unable to maintain the gap between the conductors. Partial discharges can occur at anytime: they are stochastic phenomena whose appearance is caused specially in the manufacturing or installing part of industrial pieces, every time that the electrical field of the insulating material exceeds the toleration level permitted. The energy released by partial discharges is exposed in different manners: electromagnetic emissions (light and

heat), acoustic emissions, or gas emissions (ozone and nitrous oxide).

A partial discharge can also damage the insulation material due to erosion. On top of that, since certain gases released when a discharge happens are corrosive, there might be damages due to corrosion caused by a source of partial discharges in the insulation previously mentioned or in the metallic pieces around. Ultimately, the insulation medium can fail producing a fire, causing damage in some other electric components (which can cause interruptions in the electric flow, and some other worse failures that have been mentioned previously in this resume). Regarding health and security issues, when systems for detecting partial discharges are not properly adjusted or they are inefficient, failure in high voltage and mid voltage equipment is unexpected and fatal, putting at risk the safety of the qualified personnel working when the accident occurs. Thinking about health, security and legislation, this project also includes a specific section to enumerate the applicable regulations in the work environment, preservation of the radio-electric environment and security in electronic equipment, testing and assessment of energy systems, electric isolation and measurement of partial discharges under a situation of theoretical pulses, or how to measure partial discharges, among others.

Keeping with the analysis to the theoretical concepts attached to partial discharges, this project offers as well a brief explanation for all the kinds of discharges included at the development: superficial partial discharge, inner partial discharge, and partial discharge in corona, including specific characteristics of each of them. It also contains information about the traditional technologies used for the detection of partial discharges, whose behaviour is also explained.

Hereafter, the basis for the development of the software part project will be settled, starting by evaluating the characteristics of the development environment (MathWorks) and the program language (Matlab). This framework was chosen due to its adaptability and feasibility to approach a mathematical language. On top of that, it offers great chances of exposing data in a visual shape, helped by a graphical interface integrated in the framework (MatLab GUI).

The whole problem was inspired inside a determined work environment: a GIS sub-station plant. To breathe life into the project, a real plant was the source of inspiration, accomplishing the conditions of a closed building with large dimensions. Inside this scenario, the project evaluates the measures of the building and analyses how the elements of the system proposed for the solution are located. A set of antennas is located inside the building,

accomplishing the purpose of having different heights for avoiding problems of symmetry of the plane, which would corrupt the calculations performed for the developed system.

Within the solution designed, there will be a set of criteria that will establish which points should be provided by the code, regarding to the detection and estimation of the partial discharges. The detection system will be modelled as a listener to the radio-electric environment, taking a decision when the system is capturing a partial discharge. Inside this context, and given the conditions assigned in this project, other types of interferences will be discarded of the study (with the exception of the relative noise or hypothetical partial discharges).

The technical solution will consist on the usage of correlation functions measuring the signals received by the antennas against several classic signals prearranged. The classic signals provided will be a sinc wave, a square pulse and a triangular pulse, as some of their properties resemble certain properties of the signals generated after a partial discharge.

Due to the similitude of both signals compared, the results of the correlation functions performed are quite good, offering an accurate solution for the detection of the partial discharge.

Once the discharge has been captured in time, the next step will be placing it in space. It is necessary to implement a new design, and also a new software development to provide this location. The final goal of this part will be offering an estimation of where the partial discharge is located, as response.

By comparing the differences of time obtained in the detection part, which define the journey times of each of the signals to the antennas, an iteration algorithm will be performed approaching the estimation of the partial discharge, gradually reaching a valid result.

Decision regions will divide the area where a partial discharge may happen, useful to bound the problem. They will be implemented conditioned by the first antenna that receives the signal, which will consider an reduction of the iterative process of estimating where the discharge is when location is being performed. A reduction of iterations, in a less technical view, means a reduction of processing time and resources.

To determinate which is the optimal estimation, an analysis of the error given at the estimation will be performed. The error chosen for this, is a quadratic error that considers the differences in distance between the arrival to the first antenna and the rest of the antennas.

After using the described procedure, and applying the quadratic error, the results are acceptable and they require a low number of iterations, to reach an average error of $1cm$ for the worse cases.

The results of the previous calculations can be found inside this project, with statistics measuring the relationship between the number of iterations and the error rate given, time required to perform the process, etc.

Finally, the whole process is also registered and captured inside a graphical interface designed for the occasion. It covers the generation, detection and location of the partial discharge, showing the parameters required in each case, and statistics and graphs illustrating each sub-process. The main advantage of visualizing the whole development within an interface is the robustness, and how user-friendly the process can turn: allowing the user to initiate, initiate or close the process easily (and cleaner than dealing with a large number of tabs and windows).

Reaching to a conclusion of the project, a couple suggestions are proposed for future lines of research in the field of partial discharges. Ideas such as adding some other sources of interference, for instance, electromagnetic noise (WiFi signals) that can approach to a more realistic scenario, where the challenge would be detecting a partial discharge, but this time in a channel with this type of interferences.

Another possible investigation line for a future development could be exporting the program in a mobile device, so the estimation of where the partial discharge is would be plotted inside a cartographic map. This would transform the process into a real time process, becoming more intuitive for a potential user.

Bibliografía

- [1] *The History of Partial Discharge Diagnosis*. URL: <http://www.thewatt.co.uk/2013/09/28/the-history-of-partial-discharge-diagnosis/>.
- [2] J. Mount L. Schnell. "Technology of Electrical Measurements". En: (1993).
- [3] *What is Partial Discharge Testing?* URL: <http://www.emersonnetworkpower.com/en-US/Services/Market/Industrial/Equipment-Based-Services/Predictive-Diagnostics/Pages/what-is-partial-discharge-testing.aspx>.
- [4] *Guía básica para la Prevención del Riesgo Eléctrico*. URL: http://www.todosobrelasbajaslaborales.com/datos/pdf/normativa/n004/guia_basica_para_la_preencion_del_riesgo_electrico.pdf.
- [5] *What is PD? Partial Discharge*. URL: <http://www.partial-discharge-academy.com/what-is-partial-discharge>.
- [6] *The study of acoustic emission method for detection of partial discharge in power transformer*. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=38472>.
- [7] G. Lemesch. "Ozone Measurement – A Diagnosis Tool for PD-Detection in Large Generators". En: *Iris Rotating Machine Conference* (2004).
- [8] *Pares clásicos de la transformada de Fourier*. URL: https://es.wikiversity.org/wiki/Pares_cl%C3%83%C2%A1sicos_de_la_transformada_de_Fourier.
- [9] *Descargas parciales. Definición*. URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Descarga_parcial.
- [10] *About Partial Discharge*. URL: <http://www.eatechnology.com/global/americas/about-partial-discharge>.

- [11] *PARTIAL DISCHARGE TESTING: A PROGRESS REPORT*. URL: <http://www.irispower.com/Upload/Papers/Partial%20Discharge%20Testing-%20a%20progress%20report%20%20IRMC%202013%20-%20V%20Warren.pdf>.
- [12] *What is Partial Discharge Testing?* URL: <http://www.emersonnetworkpower.com/en-US/Services/Market/Industrial/Equipment-Based-Services/Predictive-Diagnostics/Pages/what-is-partial-discharge-testing.aspx>.
- [13] *Matlab. Introducción*. URL: <http://es.mathworks.com/products/matlab/>.
- [14] *Matlab. Creating a GUI with GUIDE*. URL: <http://es.mathworks.com/videos/creating-a-gui-with-guide-68979.html>.
- [15] *GIS vs AIS – Substation Earthing*. URL: <http://electrical-engineering-portal.com/gis-vs-ais-substation-earthing>).
- [16] *Iberdrola invierte 60 millones de euros en las nuevas subestaciones de Fuencarral y Pilar, en Madrid*. URL: <http://multimediaprofesionales.iberdrola.es/Noticias/IBERDROLA,INVIERTE,MILLONES,EUROS,NUEVAS,SUBESTACIONES,FUENCARRAL,PILAR,MADRID,930.html>.
- [17] *Subestación de Fuencarral. Red Eléctrica de España (Junio 2013)*. URL: http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/diptico_fuencarral.pdf.
- [18] *Google Maps Area Calculator Tool. DaftLogic*. URL: <https://www.daftlogic.com/projects-google-maps-area-calculator-tool.htm>.
- [19] *Antenna Parametrization for the Detection of Partial Discharges*. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/icp.jsp?arnumber=6338298>.
- [20] *System Information Class for Windows*. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26662-system-information-class-for-windows>.
- [21] *Comunicaciones TCP/IP en Matlab*. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24524-tcp-ip-communications-in-matlab>.